

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta stavební**

**Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství**



**Diplomová práce**

**Zrnitostní složení rýhové eroze**

**Grain size distribution of the eroded soil**

**Bc. Romana Kubínová**

**Vedoucí práce: Ing. Petr Kavka, Ph.D.**

**Studijní program: Stavební inženýrství**

**Studijní obor: Inženýrství životního prostředí**

**2019**



## ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

#### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kubínová

Jméno: Romana

Osobní číslo: 424432

Zadávací katedra: Katedra hydromeliroací a krajinného inženýrství

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

#### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Zrnitostní složení rýhové eroze

Název diplomové práce anglicky: Grain size distribution of the eroded soil

Pokyny pro vypracování:

Na nákladě měření odtoků a eroze pomocí dešťových simulací vyhodnoťte křivky zrnatosti různými metodami. V rámci práce se zaměřte na změny v zrnatostním složení erodované půdy při vzniku erozních rýh a jejich dalšího vývoje během opakovaných umělých dešťových událostí.

Ve své práci porovnejte tradiční gravitační metody s dalšími moderními metodami. Dále se zaměřte na další faktory ovlivňující erozi, jako je sklon svahu, aktuální stav půdy, intenzita deště, atp.

Jako základní metody vyhodnocení zrnatostního složení využijte gravitační metodu, metodu stanovení zrnatost pomocí přístrojů PARIO a MALVERN 2000.

Seznam doporučené literatury:

Manuál k přístrojům PARIO a MALVERN 2000

Manuál k SW Mastersizer

Relevantní literatura indexovaná v databázích SCOPUS, WOS

Němeček, 2001, Taxonomický klasifikační systém půd ČR

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Kavka, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 28.2.2019

Termín odevzdání diplomové práce: 19.5.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

#### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

28.2.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Kavkovi, Ph.D. za odborné vedení a věcné připomínky nezbytné pro vytvoření této práce. Díky patří také Ing. Martinu Neumannovi za spolupráci a cenné rady. Dále děkuji za finanční podporu projektu „Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí“ (TH02030428), v rámci kterého mohla diplomová práce vzniknout.

## **Čestné prohlášení**

**Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Zrnitostní složení rýhové eroze“ vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce s využitím podkladů uvedených v seznamu zdrojů.**

**V Praze, dne 19. 5. 2019**

**Podpis:**

## **Abstrakt**

Obsahem této diplomové práce je stanovení a porovnání zrnitostního složení půdního sedimentu získaného z odtoku během zadešťování venkovních i laboratorních experimentálních ploch dešťovým simulátorem. V rámci práce byly porovnány tři metody pro stanovení zrnitostního složení – hustoměr, přístroj PARIO a laserový difraktometr Mastersizer 3000. Metody byly zhodnoceny z hlediska reprodukovatelnosti výsledků, časové náročnosti a použitelnosti.

Porovnáním zrnitostních křivek sedimentu, stanovených nejvhodnější metodou – laserovým difraktometrem, byl zkoumán vliv vnějších faktorů (sklon půdy, čas odběru vzorku od počátku povrchového odtoku, přítomnost protierozní geotextilie) na zrnitostní složení a obsah půdních agregátů v erodovaném sedimentu. Bylo zjištěno, že velikost částic i množství půdních agregátů v sedimentu se v průběhu trvání deště snižuje.

## **Klíčová slova**

Vodní eroze, zrnitostní složení, půdní sediment, dešťový simulátor, laserový difraktometr

## **Abstract**

In this thesis, the grain size distributions of the soil sediment obtained from runoff during raining to both outdoor and laboratory experimental plots by rainfall simulator were determined. Three methods for grain size distribution measurement – densimeter, PARIO device and laser diffractometer Mastersizer 3000 – were compared. These methods were evaluated in terms of reproducibility of results, time demands and usability.

By the comparison of the grain size distribution curves determined by laser diffractometer, the influence of external factors (soil slope, sampling time from the surface runoff, presence of anti-erosion geotextile) on the grain size distribution and soil aggregate content in eroded sediment was investigated. It has been found that both the particle size and the amount of soil aggregates in the sediment decrease over the duration of the rain.

## **Key words**

Water erosion, grain size distribution, soil sediment, rainfall simulator, laser diffractometer

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Teoretická část .....</b>	<b>11</b>
2.1 Vodní eroze .....	11
2.1.1 Průběh eroze .....	11
2.1.2 Důsledky eroze .....	12
2.2 Zrnitost půd.....	13
2.2.1 Klasifikace půd podle zrnitostního složení .....	13
2.2.2 Stanovení zrnitostního složení půd .....	15
<b>3 Praktická část.....</b>	<b>22</b>
3.1 Experimentální plochy – dešťové simulátory .....	22
3.1.1 Venkovní dešťový simulátor – experimentální lokalita Jirkov.....	22
3.1.2 Laboratorní dešťový simulátor – Fakulta stavební ČVUT v Praze .....	25
3.2 Vyhodnocování půdních vzorků.....	27
3.2.1 Laserový difraktometr Mastersizer 3000.....	27
3.2.2 Výběr reprezentativních vzorků pro vyhodnocení ostatními metodami .....	31
3.2.3 Hustoměrná zkouška.....	31
3.2.4 Přístroj PARIO.....	38
<b>4 Vyhodnocení výsledků.....</b>	<b>42</b>
4.1 Porovnání použitých metod pro stanovení zrnitostní analýzy .....	42
4.2 Měření na laserovém difraktometru Mastersizer 3000 .....	48
4.2.1 Zrnitostní složení půdního sedimentu .....	53

4.2.2	Zrnitostní složení v závislosti na přítomnosti půdních agregátů .....	56
4.2.3	Porovnání zrnitostního složení půdního sedimentu z venkovních a laboratorních experimentálních ploch .....	57
4.2.4	Porovnání zrnitostního složení suché a mokré varianty.....	58
4.2.5	Zrnitostní složení v závislosti na sklonu kontejneru .....	58
4.2.6	Zrnitostní složení v závislosti na času od počátku deště – venkovní experimentální plochy .....	60
4.2.7	Zrnitostní složení v závislosti na použitém technickém protierozním opatření.....	62
<b>5</b>	<b>Závěr a doporučení.....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Seznam zdrojů .....</b>	<b>67</b>
6.1	Literatura .....	67
6.2	Ostatní zdroje a manuály .....	68
<b>7</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>71</b>



# 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá zrnitostním složením erodovaného půdního sedimentu, který je vlivem vodní eroze odnášen ze svahů zemního tělesa pozemních komunikací, které mají extrémní sklony. Zrnitostní analýza nám dává informace o průběhu procesu tvorby rýh a o přítomnosti půdních agregátů v odnášeném sedimentu. Cílem práce bylo určit, jaký vliv mají na zrnitostní složení sedimentu vnější faktory, kterými jsou sklon půdy, čas odběru vzorku od počátku povrchového odtoku a přítomnost protierozní geotextilie na erodovaném povrchu. Výsledky zrnitostní analýzy erodovaného sedimentu se porovnály se zrnitostním složením původní půdy.

Dále byly v rámci diplomové práce porovnány tři metody pro stanovení zrnitostního složení půdního sedimentu. Nejstarší používanou metodou je hustoměrná zkouška prováděná pomocí hustoměru. Další dvě alternativní metody využívají moderních přístrojů, kterými jsou přístroj PARIO a laserový difraktometr Mastersizer 3000.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu „Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí“ (TH02030428). V rámci tohoto projektu byly vytvořeny dvě experimentální pracoviště – venkovní a laboratorní, na nichž probíhalo zadešťování dešťovými simulátory, a byl zachycován půdní sediment, pro který bylo následně stanoveno zrnitostní složení. Tento projekt se zabýval také velikostí odtoku a množstvím erodovaného sedimentu, avšak v této diplomové práci je zpracováno a vyhodnoceno pouze zrnitostní složení sedimentu.

Vodní eroze ohrožuje nejen svahy zemního tělesa pozemních komunikací, ale také veškeré zemědělské plochy. Zemědělská půda je neobnovitelným zdrojem a cenným bohatstvím každého státu. Zrychlená vodní eroze má však na úrodnost zemědělské půdy velmi negativní vliv. Dochází při ní k odnosu nejúrodnější vrstvy půdy,

snižování mocnosti půdního profilu a úbytku obsahu živin a humusu. Způsobuje tak výraznou degradaci zemědělských půd. Proto musíme půdu před jejím znehodnocováním co nejvíce chránit a negativní účinky vodní eroze snižovat. Aby ochrana půdy byla co nejefektivnější je potřeba procesy vodní eroze důkladně zkoumat a porozumět jim. (JANEČEK, 2012)

## **2 Teoretická část**

V následující části je vysvětlen princip vzniku vodní eroze a popsán vliv jejích účinků. Dále jsou představeny metody, kterými lze stanovit zrnitost půdního sedimentu odplaveného vodní erozí.

### **2.1 Vodní eroze**

Vodní eroze je přirozený proces způsobený kinetickou energií dešťových kapek dopadajících na půdu. Rozděluje se na dva druhy eroze – na normální a zrychlenou. Normální eroze způsobuje přirozené přetvoření půdního reliéfu a probíhá s takovou intenzitou, že je půda přirozeně obnovena půdotvornými procesy. Eroze zrychlená je především důsledkem lidské činnosti a probíhá rychleji než přirozená obnova půdy, čímž zemědělská půda přichází o svoji úrodnost. (EAGRI, 2019)

#### **2.1.1 Průběh eroze**

Eroze půdy probíhá ve třech procesech: narušení, transport a sedimentace půdních částic. Nejprve dešťové kapky naruší stabilitu půdních agregátů, čímž je umožněn jejich transport povrchovým odtokem dále po svahu a následná sedimentace, jakmile dojde ke snížení transportní kapacity toku. Ve většině případů je vznik erozních procesů vyvolán přívalovými srážkami, které se vyznačují krátkou dobou trvání a vysokou intenzitou deště. (DOSTÁL, 2018)

Odnos půdních částic vodní erozí nastává selektivně. V průběhu srážky se začínají tvořit dráhy soustředěného odtoku a vznikají tak erozní rýhy. V místech s nižším sklonem svahu nebo terénními depresemi se naopak uvolněný sediment usazuje. (JANEČEK, 2012)

Na odolnosti půdy vůči vodní erozi se významně podílejí půdní agregáty. Zvyšují odolnost půdy vůči erozi, neboť zvyšují její soudržnost. Rozpadem půdních agregátů se zvyšuje náchylnost zemědělské půdy

k erozi. Zvýšení obsahu půdních agregátů je možné docílit zvýšením organické hmoty v půdě – pěstováním jetelovin a trav, zeleným hnojením, ponecháním posklizňových zbytků, hnojením organickými hnojivy. Agregáty určují půdní strukturu. (JANEČEK, 2012)

### **2.1.2 Důsledky eroze**

Vodní eroze přináší mnoho negativních vlivů. Smyv půdy ze zemědělských ploch působí škody na majetku poškozeného sedimentem. Zemědělci přicházejí o zisky kvůli ztrátám na úrodě. Odnos půdy působí negativně na vodní nádrže a toky. Úrodná půda, transportovaná při erozní události obsahuje hodně živin, které vodní toky znečišťují a způsobují eutrofizaci vodních nádrží. Vodní koryta i nádrže jsou zanášena sedimentem, čímž se zmenšuje jejich kapacita. V České Republice je přes 50 % pozemků ohroženo erozí (40 % vodní, 10 % větrná). (DOSTÁL, 2018)

Aby eroze nepřinášela negativní vlivy, měla by probíhat s takovou intenzitou, aby se množství půdy odnesené smyvem stačilo nahradit přirozenou obnovou nové půdy a aby znečištění vodních zdrojů transportem půdních částic nepřesáhlo povolenou mez a nedocházelo k zanášení nádrží a toků. (DOSTÁL, 2018)

Pro předcházení problémům spojeným s vodní erozí je klíčovým prvkem snaha zabránit vzniku povrchového odtoku a transportním procesům. K těmto účelům se používá protierozních opatření, která mohou být organizační, agrotechnická nebo technická. Organizační protierozní opatření spočívají především v delimitaci kultur, kdy je na základě erozní ohroženosti nařízeno, jaké plodiny lze na pozemku pěstovat. Pozemky se sklonem nad 12° je doporučeno zatravnit a svahy větší 27° zalesnit. Agrotechnická opatření jsou založena na šetrném obdělávání půdy, které ji chrání před vodní erozí – udržování obsahu organických látek v půdě, nepoškození struktury půdy zbytečným hutněním apod. Technická protierozní opatření umožňují využívat pozemek bez omezení pěstování

plodin, účelem těchto opatření je snížení podélného sklonu nebo zkrácení délky svahu příkopy a průlehy, čímž je zpomalen povrchový odtok. (DOSTÁL, 2018)

## **2.2 Zrnitost půd**

Půda je složena z částic o různých velikostech. Zrnitost je jednou z jejích základních fyzikálních vlastností. Je definována průměrem jednotlivých zrn sedimentu. Zrnitost půdy je dána její texturou, která je ovlivněná genezí, a není možné ji měnit. Půda se dělí na jemnozem ( $<2000\ \mu\text{m}$ ) a půdní skelet ( $> 2000\ \mu\text{m}$ ). Jemnozem se dále rozděluje na písek, prach a jíl. Limity frakcí částic jsou definovány ekvivalentními průměry částic, které se liší v závislosti na národních klasifikačních systémech. (PARIO Manuál, 2018)

Zrnitostní složení půdního sedimentu se vyjadřuje pomocí zrnitostní křivky. Tato křivka je součtová čára, která udává hmotnostní zastoupení velikosti zrn v celkovém půdním vzorku o velikosti zrna menší než velikost  $d$ . (SNĚHOTA, 2018)

### **2.2.1 Klasifikace půd podle zrnitostního složení**

Pro zatřídění půdy podle jejího zrnitostního složení se nejčastěji používá klasifikace půdního druhu podle Nováka nebo zatřídění zrnitostní třídy podle USDA NRCS (United States Department of Agriculture – Natural resources conservation service) trojúhelníkového diagramu. (ŠIMEČKOVÁ, 2015)

Klasifikace půdního druhu podle Nováka (Tabulka 1) rozděluje půdy do sedmi kategorií půdního druhu, od půd písčitých po nejjemnější půdy označené jako jíl, podle procentuálního zastoupení jemných částic o velikosti menší než  $10\ \mu\text{m}$ . (ŠIMEČKOVÁ, 2015)

**Tabulka 1: Klasifikace půdního druhu podle Nováka (ŠIMEČKOVÁ, 2015)**

Obsah částic < 0,01 mm [mm]	Označení durhu půdy	Zkratka	Klasifikace půdy
0 - 10	píščitá	P	lehká
10. - 20	hlinitopíščitá	HP	
20 - 30	píščitohlinitá	PH	středně těžká
30 - 45	hlinitá	H	
45 - 60	jílovitohlinitá	JH	těžká
60 - 75	jílovitá	JV	
>75	jíl	J	

Zatřídění podle trojúhelníkového diagramu (Obrázek 1) je založeno na znalosti poměrného zastoupení tří základních frakcí půdy: písek ( $50\text{ }\mu\text{m}$  –  $2000\text{ }\mu\text{m}$ ), prach ( $2\text{ }\mu\text{m}$  –  $50\text{ }\mu\text{m}$ ) a jílu ( $< 2\text{ }\mu\text{m}$ ). Po vynesení těchto hodnot do trojúhelníkového diagramu je půda zatříděna do jedné z dvanácti zrnitostních tříd. (ŠIMEČKOVÁ, 2015)



**Obrázek 1: Trojúhelníkový diagram - NRCS USDA (ŠIMEČKOVÁ, 2015)**

## 2.2.2 Stanovení zrnitostního složení půd

Zrnitostní složení půd je možné určit několika metodami. Některé metody využívají rozdílných sedimentačních rychlostí částic v závislosti na jejich velikosti podle Stokesova zákona. Stokesův zákon říká, že částice sférického tvaru se usazují v suspenzi s charakteristickou rychlostí, která je určena viskozitou tekutiny, rozdílem hustoty mezi částicemi a suspenzní kapalinou a průměrem částic. Výpočtové rovnice platí pouze pro laminární usazování částic. (PARIO Manuál, 2018)

Stokesův zákon je dán vztahem:

$$V = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{\eta} (\rho_s - \rho_k),$$

kde:

$V$  – rychlost sedimentace kulové částice v suspenzi,

$g$  – tíhové zrychlení,

$r$  – poloměr sedimentující částice,

$\rho_s$  – specifická hmotnost zeminy,

$\rho_k$  – specifická hmotnost kapaliny,

$\eta$  – koeficient dynamické viskozity kapaliny. (NĚMEČEK, 1990)

Na tomto principu je založena často používaná hustoměrná zkouška. Další možností jak určit zrnitostní složení půdního sedimentu s využitím znalosti Stokesova zákona je přístroj PARIO. (PARIO Manuál, 2018)

Modernější metody jsou založeny na analýze rozptylu světla při průchodu částic jeho paprskem. Na principu laserové difrakce funguje přístroj Mastersizer 3000. (MASTERSIZER Manuál, 2017)

### 2.2.2.1 Použité metody

V této práci byla zrnitostní analýza erodovaných půdních vzorků získaných měřeními na experimentálních plochách vyhodnocena třemi

různými metodami. Všechny vzorky byly změřeny pomocí laserového difraktometru Mastersizer 3000. Hustoměrná zkouška a přístroj PARIO byly použity pouze pro několik vybraných půdních vzorků.

Moderní technologie vyhodnocující zrnitostní složení půdních vzorků jsou založeny na různých principech. Přístroj Mastersizer 3000 využívá principu rozdílného rozptylu laserového paprsku při průchodu částice o různé velikosti. Přístroj PARIO je stejně jako hustoměrná zkouška založen na platnosti Stokesova zákona, který říká, že částice se v suspenzi usazují charakteristickou rychlostí.

#### **2.2.2.1.1 Hustoměrná zkouška**

Hustoměrná zkouška je nepřímá metoda používaná pro stanovení zrnitostního rozboru. Je založena na sledování kontinuální sedimentace půdního vzorku v odměrném válci podle Stokesova zákona. Měření hustoty probíhá v různých časových intervalech a provádí se speciálním hustoměrem se stupnicí s rozsahem 1,000 až 1,030. Spodní hranice vymezuje platnost Stokesova zákona, která je pro koncentrace zemitých suspenzí mimo tento rozsah omezena vzájemnými interakcemi částic. Hustoměrnou zkoušku je možné provádět pouze na porušeném půdním vzorku. (SNĚHOTA, 2018)

#### **2.2.2.1.2 Laserový difraktometr Mastersizer 3000**

Mastersizer 3000 je přístroj navržený nejen pro měření velikosti částic, ale také pro určení distribuce různých velikostí částic ve vzorku. Hodnoty, které přístroj naměří, dále vyhodnocuje software Malvern.

#### **Princip měření**

Velikost částic je určena na základě rozptylu světelného paprsku. K určení závislosti mezi velikostí částic a intenzitou záření se používají teorie Fraunhoferova modelu a Mieho teorie rozptylu. (MASTERSIZER Manuál, 2017)



Fraunhoferův model předpovídá, jak bude vypadat rozptyl, který vznikne, když pevný neprůhledný disk projde laserovým paprskem. Předpoklad neprůhledného disku může být pro malé částice nepřesný, a to ve chvíli, kdy je relativní index lomu daného materiálu blízký jedné, nebo pokud je částice transparentní. (MASTERSIZER Manuál, 2017)

Mieho teorie se zabývá způsobem, jakým je rozptýleno světlo sférickými částicemi a jak světlo prochází nebo je částicí absorbováno. Je založena na Maxwellových rovnicích elektromagnetického pole. Mieho teorie předpovídá pro všechny částice, jak bude vypadat rozptyl laserového paprsku způsobený povrchem částic na základě rozdílu indexu lomu mezi částicemi a disperzním médiem. Dále ukazuje, jak bude vypadat sekundární rozptyl laserového paprsku způsobeného lomem světla v částici, což je zvláště důležité, pokud jsou částice menší než 50  $\mu\text{m}$  nebo jsou-li transparentní. Aby mohlo být při zrnitostní analýze laserovým difraktometrem využito Mieho teorie, musí být známy indexy lomu pro analyzovaný materiál i disperzní médium a absorpční část indexu lomu materiálu. (MASTERSIZER Manuál, 2017)

Obě tyto teorie využívají informace o velikosti částic a jejich struktuře k určení způsobu, jakým se bude světlo rozptylovat. Přístroj Mastersizer funguje na opačném principu – na základě skutečného rozptylu světla částicemi zachyceného na optické kazetě vyhodnotí pomocí výše uvedených teorií velikosti částic, které konkrétní rozptyl způsobily. (MASTERSIZER Manuál, 2007)

Samotné měření pak probíhá ve třech krocích. Prvním z nich je příprava vzorku na požadovanou koncentraci, který se následně dostane k optické kazetě. V dalším kroku pole jednotlivých detektorů v optické kazetě změří rozptyl z připraveného vzorku. Každý detektor zachycuje rozptyl světla z určitého rozsahu úhlů a vytvoří snímek rozptylu ze vzorku, který prochází paprskem v daném čase. Těchto snímků se vytvoří kolem 2000 během jednoho měření a následně se průměrují pro dosažení reprezentativního výsledku. Po dokončení měření vyhodnocuje

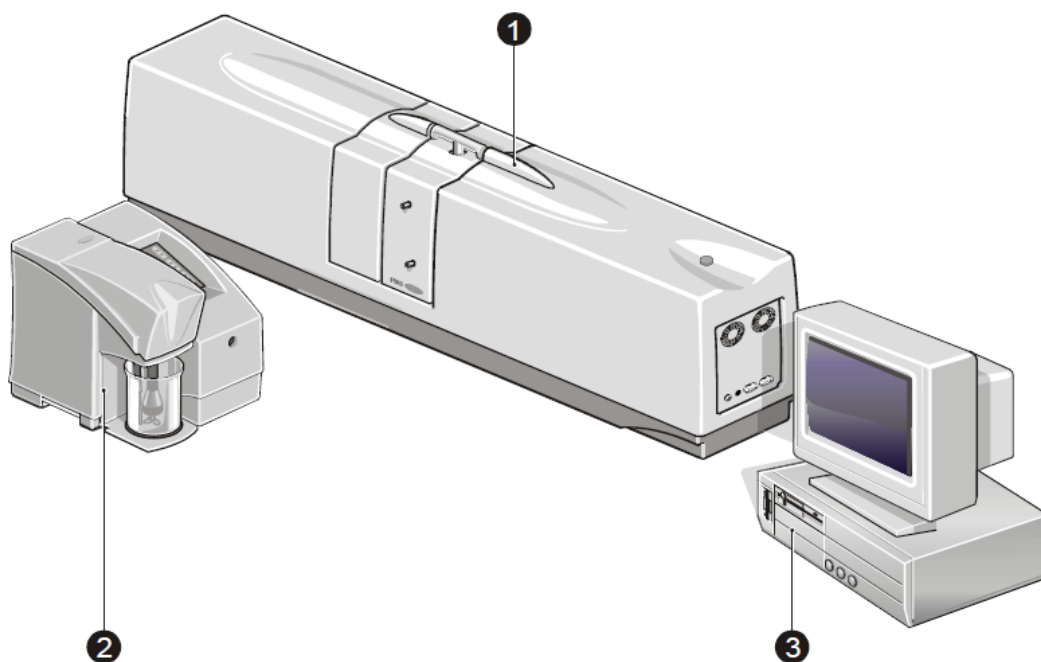
software Malvern získaná data za použití výše uvedených teorií. (MASTERSIZER Manuál, 2007)

Díky principům, kterých laserový difraktometr využívá, umožňuje na rozdíl od hustoměrných zkoušek, založených na platnosti Stokesova zákona, analýzu zrnitosti na neporušeném i porušeném půdním vzorku. Během zrnitostní analýzy lze spustit ultrazvuk, který rozbije půdní agregáty, čímž se z neporušeného vzorku stane vzorek porušený. Rozptýlení vzorku pomocí ultrazvuku je způsobeno zvukovými vlnami, které indukují smykové napětí, čímž poruší vazby mezi částicemi, které se od sebe oddělí. (MASTERSIZER Manuál, 2017)

### **Části měřicího systému**

Laserový difraktometr se skládá ze tří základních částí – optická kazeta, jednotka pro přípravu rozptylu vzorku a počítačový systém (Obrázek 2).

Optická kazeta shromažďuje data o rozptylu světla částicemi, které jí procházejí. Z těchto dat je následně možné získat velikost částic ve vzorku. Jednotka pro přípravu rozptylu vzorku slouží pouze k namíchání vzorku s vodou v kádince tak, aby bylo dosaženo požadované koncentrace a mohl být vzorek dopraven k optické kazetě. Počítačový systém obsahuje software Malvern, který dohlíží na činnost optické kazety a jednotky pro přípravu vzorku a především analyzuje hodnoty z optické kazety pro určení velikosti částic vzorku. (MASTERSIZER Manuál, 2007)



Obrázek 2: Příklad Mastersizer (1 - optická kazeta, 2 - jednotka pro přípravu rozptýlu vzorku s kádinkou, 3 - počítačový systém). (MASTERSIZER Manuál, 2007)

#### 2.2.2.1.3 Příklad PARIÓ

Příklad PARIÓ je automatizovaný systém pro určení zrnitostní analýzy půd. Hodnoty získané přístrojem PARIÓ dále vyhodnocuje software PARIÓ Control. (PARIÓ Manuál, 2018)

##### Princip měření

Zrnitostní křivku prachových částic získává přístroj pomocí principu sedimentační metody založené na platnosti Stokesova zákona. Analýza frakce písku se provádí externě přímou analýzou na sítích. Zbylá jílová frakce je dopočítána softwarem PARIÓ Control odečtením pískové a prachové fáze od celkového množství zeminy.

Zrnitostní analýza probíhá na principu ISP metody (Integral Suspension Pressure), která je založena na poklesu tlaku v hloubce měření v suspenzi měřeného vzorku s destilovanou vodou.

Rychlost usazování se vypočítá pomocí viskozity a hustoty vody závislé na teplotě a hustoty půdního vzorku, která je do softwaru zadána ručně.

Přístroj PARIO po celou dobu měření teplotu zaznamenává a následně určí její průměrnou hodnotu.

Výsledky měření analyzuje software PARIO Control. Software nabízí dva klasifikační systémy, německý půdní klasifikační půdní systém KA 5 a USDA klasifikační systém. Výsledkem měření jsou čtyři výstupní okna. První z nich jsou naměřená data tlaku a teploty vynesena do grafu v závislosti na čase. Dalším výstupním oknem je kumulativní křivka zrnitosti, kterou software správně vykreslí až po vložení hodnot z měření na sítech. Zatřídění textury měřeného vzorku je k dispozici ve třetím výstupním okně. Sloupcový graf znázorňuje hmotnostní zastoupení částic v dané kategorii (jíl, prach, písek) a jejich podkategorií. Posledním výstupním oknem je zatřídění měřeného vzorku podle trojúhelníkového diagramu. Všechny informace z výstupních oken je možné exportovat. (PARIO Manuál, 2018)

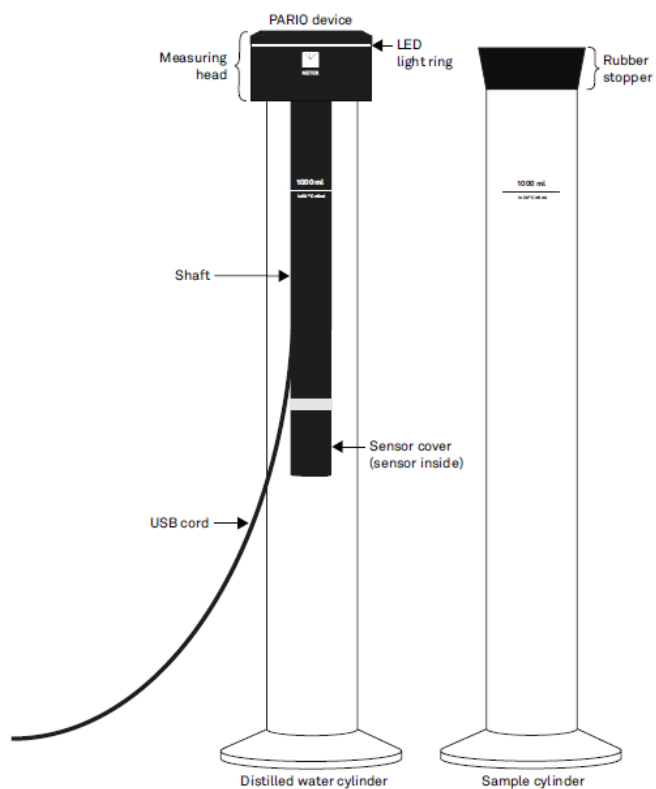
### **Části měřicího systému**

Měřicí systém zahrnuje přístroj PARIO, dva skleněné válce a gumovou zátku. (Obrázek 3)

Samotný přístroj PARIO se skládá z hřídele a měřicí hlavy. Přístroj obsahuje tlakový a teplotní senzor umístěný na špičce hřídele, která je připojena k měřicí hlavě, kde jsou informace o tlaku a teplotě zpracovávány. Naměřená data jsou do počítače přenášena přes USB připojení.

Jeden skleněný válec je určen pro samotnou destilovanou vodu, ve kterém se přístroj PARIO kalibruje, a druhý válec obsahuje suspenzi destilované vody a vzorku půdního sedimentu. Oba válce se naplňují objemem 1000 ml.

Gumová zátka slouží k těsnému uzavření válce se suspenzí analyzovaného vzorku, aby bylo možné jeho obsah před samotným měřením důkladně promíchat. (PARIO Manuál, 2018)



**Obrázek 3: Měřicí systém PARIO – přístroj PARIO, dva skleněné válce, gumová zátka (PARIO Manuál, 2018)**

## **3 Praktická část**

V praktické části bylo analyzováno zrnitostní složení půdních sedimentů, který byl odplaven z experimentálních ploch během simulovaných dešťových událostí. Experimenty probíhaly na dvou lokalitách. První z nich byla v obci Jirkov, ležící v okrese Chomutov a druhá v hydraulické laboratoři ČVUT. Půda použitá pro experimenty byla běžná ornice o hloubce 15 cm. Experimentální plochy byly zkrápěny dešťovými simulátory. Jednotlivé experimenty se lišily sklonem kontejnerů s půdním vzorkem, materiálem použitým pro ochranu půdy před erozí, časem odběru půdního vzorku od počátku dešťové epizody. Všechny experimenty byly prováděny za podpory projektu TH02030428.

Zrnitostní analýza všech odebraných vzorků půdního sedimentu probíhala pomocí laserového difraktometru Mastersizer 3000. Pro porovnání dostupných metod na vyhodnocení zrnitostního složení bylo vybráno několik vzorků, které byly analyzovány ještě hustoměrnou metodou pomocí hustoměru a přístroje PARIO.

### **3.1 Experimentální plochy – dešťové simulátory**

Půdní vzorky pro zrnitostní rozbor byly odebírány ze dvou experimentálních lokalit. První z nich byly experimentální plochy v prostorách areálu firmy STRIX Chomutov a.s. v Jirkově v období od dubna do listopadu 2018. Druhá lokalita byla hydraulická laboratoř s dešťovým simulátorem na Fakultě stavební ČVUT v Praze.

#### **3.1.1 Venkovní dešťový simulátor – experimentální lokalita**

##### **Jirkov**

V areálu firmy STRIX bylo vytvořeno pět experimentálních ploch o rozměrech 4,25 m x 2,4 m, z nichž tři plochy měly nainstalován dešťový

simulátor a bylo je možné skrápět umělým deštěm, zbylé dvě plochy byly určené pro dlouhodobý monitoring přirozených dešťů.

Trysky dešťových simulátorů byly upraveny tak, aby bylo dosaženo potřebného tlaku pro dostatečnou rovnoměrnost postřiku. Sklony kontejnerů s půdním vzorkem byly nastaveny podle limitních sklonů pro konstrukce náspů a zářezů dle ČSN 73 6133 – „Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací“ a to 1:1,5 (34°); 1:1,75 (30°) a 1:2,5 (22°).

Každá z experimentálních ploch byla podélně rozdělena na dvě části, na jedné polovině byl pouze úhor bez opatření, na druhé polovině byly postupně použity různé geotextilie jako technická protierozní opatření (Obrázek 4). Použité protierozní materiály byly kokosové vlákno, polyamidové vlákno, polypropylen a slaměná vlákna. Na konci každé plochy byl umístěn sběrný žlab pro zachycení sedimentu. (KAVKA, 2017)

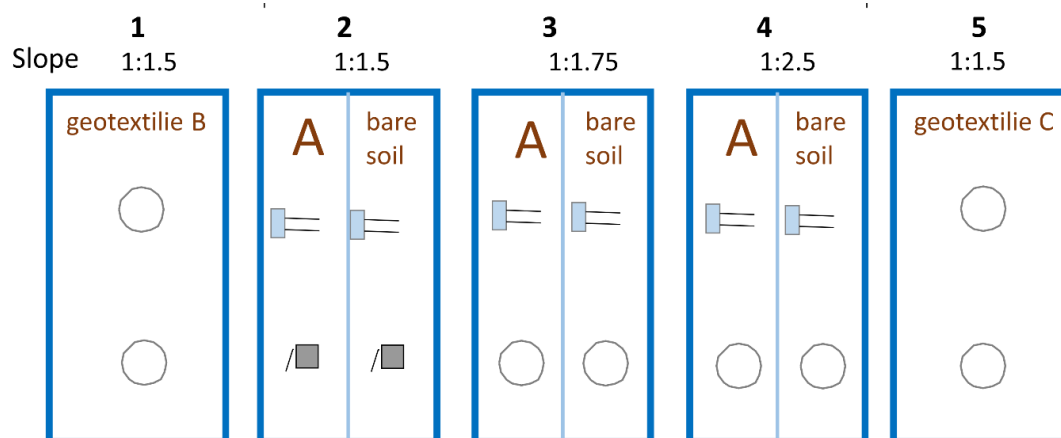


Obrázek 4: Venkovní experimentální plochy v Jirkově (KAVKA, 2017)

### 3.1.1.1 Postup odebrání půdních vzorků

Během zadešťování proběhlo na každé z ploch osm odběrů půdního vzorku, zachyceného sběrným žlabem na konci plochy opatřené pouze úhorem. Pro každý materiál proběhl experiment na třech různých sklonech kontejneru s půdou – 22°, 30°, 34° (Obrázek 5). Na plochách

s protierozní geotextilií bylo zaznamenáváno pouze množství erodovaného sedimentu a objem odtoku.



Obrázek 5: Schéma experimentálních kontejnerů (KAVKA, 2017)

První dva vzorky byly odebrány během první dešťové epizody, kdy má půda ještě přirozenou vlhkost – první po patnácti minutách (S1) a druhý po třiceti minutách (S2) doby trvání deště. Následovala patnáctiminutová pauza, kdy plocha nebyla zadešťována. Další dva odběry proběhly opět po patnácti (M1) a třiceti minutách (M2) od začátku druhé dešťové epizody. Tentokrát již ale půda byla plně nasycena po předchozí srážce.

Následujících deset dní byl kontejner ponechán, aby experimentální plochy vysychaly a pak proběhlo další zadešťování, během kterého proběhl stejný postup při odebírání vzorků jako při prvním experimentu – dva vzorky odebrané na půdě s přirozenou vlhkostí (S3, S4) a poté dva vzorky z půdy plně nasycené po dešťové epizodě (M3, M4). Rozdílem druhého experimentu bylo, že půda v kontejneru před začátkem události již obsahovala erozní rýhy z předchozího zadešťování.

Pro každou plochu tak vzniklo osm vzorků sedimentu (Tabulka 2) – čtyři odebrané jako suchá varianta (S1, S2, S3, S4) a čtyři jako varianta mokrá (M1, M2, M3, M4), se kterými se dále pracovalo v laboratoři, kde byl analyzován zrnitostní rozbor půdního vzorku.



**Tabulka 2: Označení vzorků erodovaného sedimentu při jejich odebírání z experimentálních ploch**

	zadešťování		pauza	zadešťování	
	15 minut	30 minut	15 minut	15 minut	30 minut
První měření	S1	S2		M1	M2
desetidenní pauza					
Druhé měření	S3	S4		M3	M4

### **3.1.2 Laboratorní dešťový simulátor – Fakulta stavební**

#### **ČVUT v Praze**

Laboratorní dešťový simulátor ČVUT v Praze se používá především pro účely výzkumu vodní eroze na zemědělské půdě sledováním povrchového odtoku a sedimentu. Jeho hlavní výhodou je využitelnost po celý rok, možnost nastavení konkrétních podmínek a opakování experimentů.

Dešťový simulátor se skládá ze dvou částí – ze zadešťovače s tryskami s vodou a kontejneru s půdním vzorkem. Kontejner s půdním vzorkem je možné oddělit od pojízdné zadešťovací sklopné části a pomocí nosného podvozku s koly a jeřábu ho dostat mimo zadešťované území, kde lze půdní vzorek vyměnit.

Hydraulické píсты dokáží naklopit kontejner až s 3000 kg půdního vzorku a je možné dosáhnou maximálního sklonu 45°. Konstrukce zadešťovače se naklání rovnoběžně s povrchem půdního vzorku v kontejneru a je tak zajištěna stále stejná pádová výška kapek při různých sklonech. Zadešťovací konstrukci lze nastavit na různé výšky trysek nad povrchem po 10 cm od 2 m do 2,8 m.

Déšť generovaný tryskami umožňuje dvě standardně používané metody, kterými jsou kyvný princip a pulzní systém. Kyvný princip spočívá

v naklání trysek nad zadešťovanou plochou. Pulzní systém má intenzitu kapek danou přerušováním vody pomocí ventilů.

Dešťový simulátor umožňuje nastavení teploty půdního vzorku od  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , díky této funkci je možné sledovat procesy na zmrzlé půdě.

Dešťový simulátor lze díky řídicí jednotce bezdrátově monitorovat pomocí PC, čímž je možné nastavit a kontrolovat veličiny experimentu tak, aby byly zachovány stále stejné podmínky po celou dobu měření. (KAVKA, 2018)

### **3.1.2.1 Postup odebírání půdních vzorků**

Na laboratorním dešťovém simulátoru probíhaly experimenty, které se lišily sklonem kontejneru –  $10^{\circ}$  nebo  $20^{\circ}$ , intenzitou deště, která byla nastavena na  $40\text{ mm/h}$  nebo  $60\text{ mm/h}$ , nebo systémem pro generování deště tryskami, který může být kyvný nebo pulzní.

Pro každý experiment byly vzorky odebírány ve třech časových intervalech od počátku zadešťování – 2,5 minuty, 15 minut a 27,5 minuty. Nejdříve byly půdní vzorky odebírány jako suchá varianta, kdy ještě není půda plně nasycena, po patnácti minutové pauze se celý proces zadešťování opakoval a ve stejných časových intervalech se odebraly půdní vzorky na variantě mokré s plně nasycenou půdou z předchozího deště. Na laboratorním dešťovém simulátoru byl proveden jeden experiment, během kterého byla aplikována protierozní geotextilie a erodovaný sediment byl zachycen pro následnou zrnitostní analýzu.

## **3.2 Vyhodnocování půdních vzorků**

Zrnitostní složení veškerých půdních vzorků odebraných na experimentálních plochách v Jirkově i na laboratorním dešťovém simulátoru na Fakultě stavební bylo analyzováno laserovým difraktometrem Mastersizer 3000. Venkovních experimentů bylo laserovým difraktometrem změřeno celkem 156 a vzorků z laboratoře 72. Pro pět vybraných vzorků byla zrnitostní analýza vyhodnocena ještě hustoměrem a přístrojem PARIO.

### **3.2.1 Laserový difraktometr Mastersizer 3000**

Laserovým difraktometrem byla provedena zrnitostní analýza všech půdních vzorků odebraných z venkovních i laboratorních experimentálních ploch. Přístroj Mastersizer 3000 se nachází v analytické laboratoři Katedry zdravotního a ekologického inženýrství na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Měření zrnitosti jednoho půdního vzorku laserovým difraktometrem trvalo necelých 15 minut.

#### **3.2.1.1 Nastavení přístroje**

Laserový difraktometr Mastersizer 3000 umožňuje dva způsoby měření, manuální měření nebo měření za použití standartních operačních postupů (SOPs). Manuální měření slouží k jednorázovému měření nebo k otestování vzorku pro nastavení SOPs. SOPs jsou uživatelem definované postupy, které lze do softwaru naprogramovat. Používají se pro měření opakovaná stále stejným způsobem. Po jeho spuštění vyzve uživatele k jednotlivým krokům bez nutnosti opětovného nastavování podmínek měření.

Pro zrnitostní analýzu půdních vzorků byl nastaven jeden standardní operační postup (SOP), který se použil pro všechny vyhodnocované vzorky. Tento standardní operační postup bylo nutné spouštět manuálně, aby mohl být během měření ručně aktivován ultrazvuk.

Pro dosažení přesných výsledků, které software vypočte na základě informací z laserového difraktometru, je nutné zadat před začátkem měření informace o analyzovaném materiálu a disperzním médiu. Po konzultaci s dodavatelem přístroje byl z databáze softwaru vybrán materiál oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ), který má nejpodobnější vlastnosti s půdou. Software na základě vybraného materiálu přiřadil hodnotu indexu lomu a absorpční části lomu (Obrázek 6). Tyto hodnoty jsou potřebné pro správnou platnost Mieho teorie rozptylu, na jejímž principu je výpočet zrnitosti založen.

Material properties	
Material name	Silica SiO <sub>2</sub>
Refractive index	1.457
Absorption index	0.010
Particle density	1.00 g/cm <sup>3</sup>
Different optical properties in blue light	No
Notes	National Physical Laboratory <a href="http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_5/2_5_8.html">http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_5/2_5_8.html</a>
Dispersant properties	
Dispersant name	Water
Refractive index	1.330
Level sensor threshold	100.000

Obrázek 6: Nastavení vlastností materiálu pro zrnitostní analýzu laserovým difraktometrem

Naměřená data půdního vzorku mohou být ovlivněna elektrickým šumem na pozadí, prachem usazeným na optice nebo kontaminanty vznášejícími se v čisté destilované vodě. Aby nedocházelo ke zkreslení dat tímto způsobem, probíhá před přidáním půdního vzorku do kádinky s destilovanou vodou měření pozadřové hodnoty. Přístroj provede měření čisté destilované vody a zjištěné hodnoty následně odečte od hodnot měřených na půdním vzorku. Doba trvání měření pozadřové hodnoty byla nastavena na 20 vteřin, aby bylo zajištěno správné vyhodnocení tohoto parametru. Tímto byla výsledná data od nežádoucích vlivů očištěna.

Dále bylo nutné nastavit, jak velké má být množství půdního vzorku, které přístroj vyhodnocuje. Optimální koncentrace vzorku je určena zatemňováním laserového paprsku způsobeného půdním vzorkem. Tato hodnota byla nastavena na rozmezí 10 – 30 %. Množství půdního vzorku

přidaného do kádinky je pak kontrolováno softwarem, který hlásí, zda je množství příliš malé nebo naopak moc velké.

Analýza každého vzorku byla nastavena tak, aby proběhlo vždy 25 měření a každé z nich trvalo 10 vteřin. Během těchto měření byly zaznamenávány informace o rozptylu laserového paprsku. Během prvních pěti měření byl analyzován neporušený půdní vzorek, tedy vzorek i s půdními agregáty. Poté byl manuálně spuštěn ultrazvuk. Doba, po kterou byl ultrazvuk aktivní byla nastavena na 320 vteřin. Jakmile tato doba uplynula, byly již všechny půdní agregáty díky ultrazvuku rozbity a posledních pět měření proběhla analýza zrnitosti na porušeném půdním vzorku.

Po skončení měření každého půdního vzorku musí být přístroj vyčištěn. Software uživatele navede, jak má při čištění postupovat. Pro zrnitostní rozbor bylo nastaveno rychlé čištění. Dále software sám nahlásí, pokud je příliš znečištěno sklíčko v optické kazetě, přes které procházejí laserové paprsky, a je nutné ho vyčistit. Zpravidla je potřeba sklíčko čistit zhruba po deseti změřených vzorcích.

Measurement duration	
Background measurement duration (red)	20.00 s
Sample measurement duration (red)	10.00 s
Perform blue light measurement?	Yes
Background measurement duration (blue)	20.00 s
Sample measurement duration (blue)	10.00 s
Assess light background stability	No
Measurement sequence	
Aliquots	1
Automatic number of measurements	No
Pre-alignment delay	0.00 s
Number of measurements	25
Delay between measurements	0.00 s
Pre-measurement delay	0.00 s
Close measurement window after measurement	No
Measurement obscuration settings	
Auto start measurement	No
Obscuration low limit	10.00 %
Obscuration high limit	30.00 %
Enable obscuration filtering	No

Obrázek 7: Nastavení parametrů měření zrnitostní analýzy laserovým difraktometrem

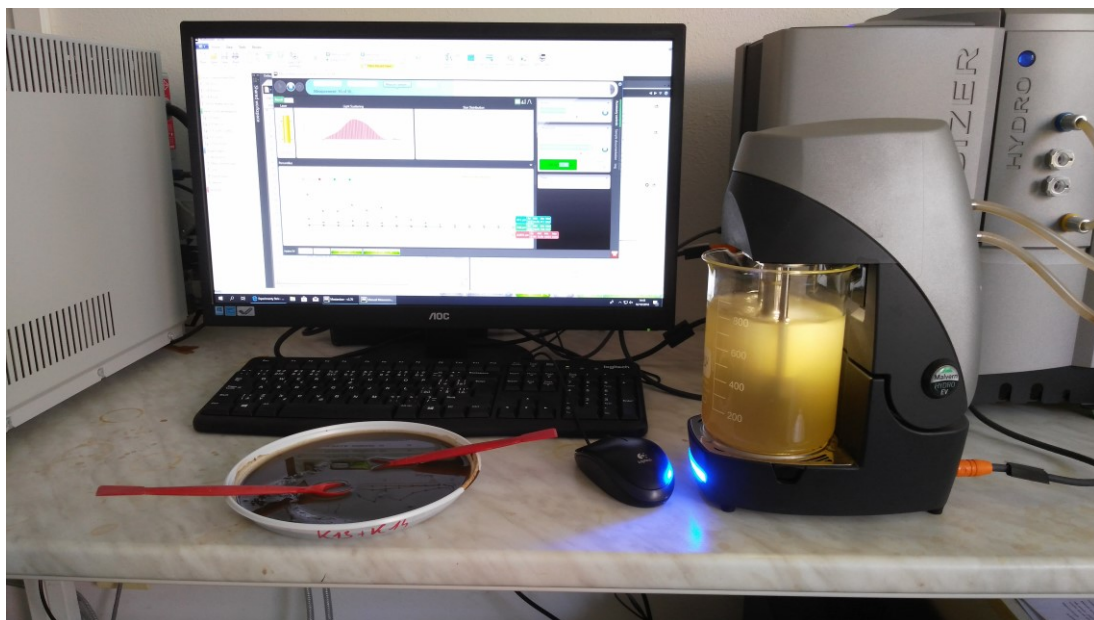
### 3.2.1.2 Postup měření

Půdní vzorek pro zrnitostní analýzu přístrojem Mastersizer 3000 musel být důkladně promíchán, aby i malé množství, které bylo pro měření

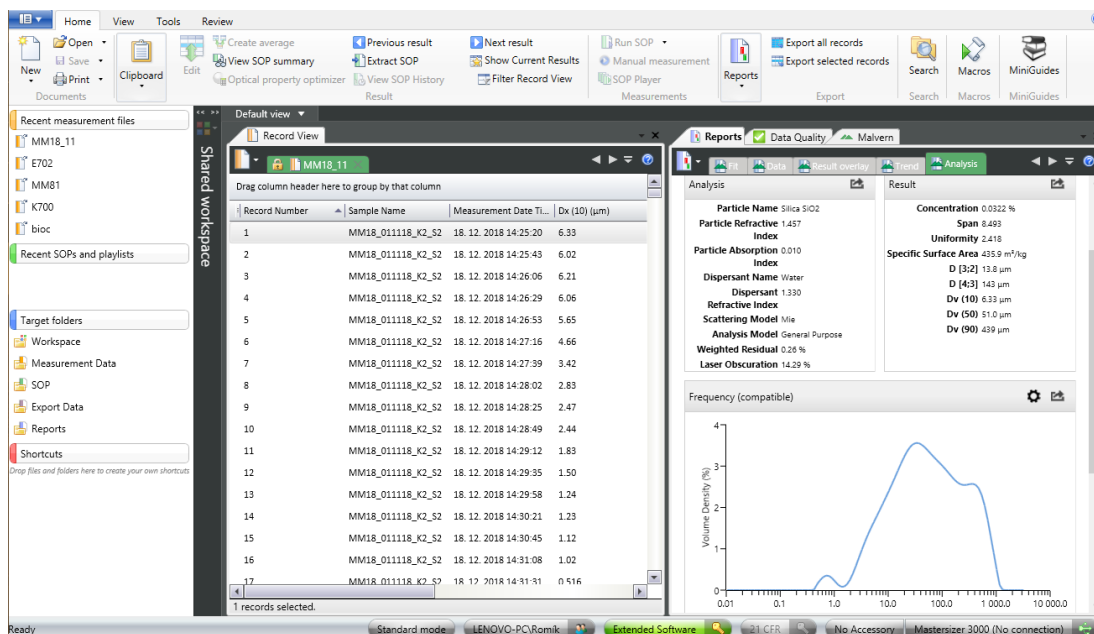
použito, poskytlo dostatečnou reprezentativnost celého vzorku. Vzorek zároveň nesměl obsahovat přebytečné množství vody.

Jelikož se pro všechna měření používal stále stejný postup a nastavení zůstalo uloženo, software sám naváděl uživatele jak postupovat.

Do kádinky se 700 ml destilované vody bylo přidáno množství půdního vzorku tak, aby bylo dosaženo požadované koncentrace. Poté bylo možné spustit měření. Suspenze začala proudit skrz optickou kazetu a byly zaznamenávány informace o rozptylu laserového paprsku způsobeného částicemi půdního vzorku (Obrázek 8, Obrázek 9). Po pěti měřeních bylo nutné manuálně spustit ultrazvuk, který byl aktivní po dobu 320 vteřin. Když proběhlo všech 25 měření, bylo potřeba vyměnit suspenzi půdního vzorku s destilovanou vodou v kádince za čistou vodu a nechat přístroj, aby se propláchnul. Poté se kádinka naplnila destilovanou vodou a mohlo proběhnout další měření.



Obrázek 8: Měření zrnitostního složení přístrojem Mastersizer 3000



Obrázek 9: Software Malvern – hlavní okno s naměřenými daty

### 3.2.2 Výběr reprezentativních vzorků pro vyhodnocení ostatními metodami

Pro zrnitostní analýzu hustoměrnou zkouškou přístrojem PARIO a hustoměrem bylo vybráno pět půdních vzorků, všechny z venkovních experimentálních ploch v Jirkově. Pro tři z nich byl sklon kontejneru s půdou 30° a byly vybrány vzorky M1, M2 a S3. Další dva vzorky byly oba odebrány jako M2 a kontejner měl při experimentu sklon 34°.

### 3.2.3 Hustoměrná zkouška

Zrnitostní analýza pěti vybraných půdních vzorků provedená pomocí hustoměru proběhla v pedologické laboratoři Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Všech pět vzorků bylo analyzováno najednou pěti hustoměry. Měření probíhalo 48 hodin.

#### 3.2.3.1 Postup měření

Zrnitostní rozbor založený na sedimentaci částic vyžaduje nejprve standardní přípravu vzorku. Půdní vzorek byl nejprve rozdužen třením

v třecí misce s tloučkem, dále byl vzorek přeset přes síto s oky o velikosti 2 mm. Tím byla oddělena jemnozem od půdního skeletu, jehož zrnitostní složení nebylo pro naši analýzu důležité.

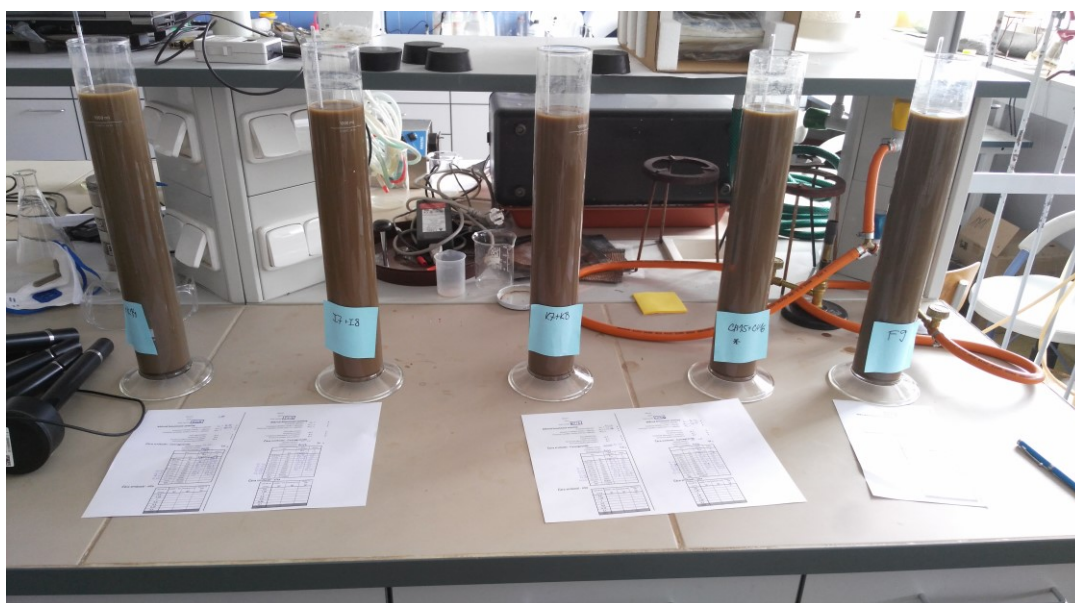
Dále bylo potřeba rozrušit půdní agregáty, aby bylo možné analyzovat půdní texturu, tedy zrnitost (Obrázek 10). Ve varné nádobě bylo přivedeno k varu a patnáct minut vařeno 40 g půdního vzorku s 40 ml hexametafosforečnanu sodného. Následně byla stříčkou vymývána jemná frakce suspenze z varné nádoby do odměrného válce. Písčité frakce zůstaly ve varné nádobě a byly dány do sušárny, aby je bylo možné analyzovat proséváním na sítích.



Obrázek 10: Rozrušování půdních agregátů



Suspenze získaná předchozím postupem byla dolita na objem 1000 ml v odměrném válci. Následně byl celý obsah válce důkladně promíchán a byla změřena teplota. Ukončení míchání byl počáteční čas  $t_0$ , od kterého byly určovány časové intervaly, ve kterých byl sledován sedimentační proces odečtem na hustoměru (Obrázek 11). Hustoměr byl do odměrného válce vložen ihned po ukončení míchání. Časové intervaly odečtů byly 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 25 min, 50 min, 75 min, 2,5 hod, 24 hod a 48 hod.



Obrázek 11: Měření zrnitostního složení hustoměru

Zrnitostní složení písčité složky oddělené od jemné suspenze bylo stanoveno proséváním na sítích. Byla použita síta s velikostí ok 2 mm, 1,25 mm, 1 mm, 0,8 mm, 0,5 mm, 0,25 mm a 0,01 mm. Sada sít s půdním vzorkem byla umístěna do prosévacího stroje a nechala se několik minut prosévat. Následně byla zvážena hmotnost půdního vzorku zachycena na každém ze sít (Obrázek 12).



Obrázek 12: Sada sít v prosévacím přístroji

### 3.2.3.2 Vyhodnocení měření

Pro vyhodnocení zrnitostní analýzy jemné suspenze byly použity dva vzorce. Poměrné zastoupení částic v daném čase měření hustoty bylo vypočítáno vzorcem:

$$O_{(t)} = \frac{100}{s} \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} (R + c + m),$$

kde:

$O$  – poměrný obsah částic v daném čase měření [% hm.],

$s$  – navážka zeminy k zrnitostní analýze přepočtená na sušinu [g],

$\rho_s$  – měrná hmotnost zeminy [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],

$R$  – čtení na hustoměru,

$c$  – menisková korekce,

$m$  – teplotní korekce ( $m = 0.0055T^2 - 0.0373T - 1.44$ ), kde  $T$  – teplota suspenze [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Druhý vzorec byl použit pro určení velikosti zrna  $D$  odpovídající vypočtenému hmotnostnímu podílu:

$$D_{(t)} = 10 \cdot \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot H}{g \cdot t \cdot (\rho_s - \rho_0)}},$$

kde:

$D$  - průměr zrna [mm],

$\eta$  - dynamická viskozita tekutiny (vody), ( $\eta = 0.017e^{-0.025T}$ ) [ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ],

$\rho_s$  – měrná hmotnost zeminy [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],

$\rho_0$  – měrná hmotnost vody [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],

$H$  - odpovídající hloubka hustoměru v suspenzi [cm],

$R$  – čtení na hustoměru,

$g$  – gravitační zrychlení [ $981 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ],

$t$  - čas měření [s],  $v$  - usazovací rychlost [ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $T$  – teplota suspenze [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Pro vyhodnocení písčité frakce byly vyjádřeny zachycené podíly zeminy na sítích jako poměrné zastoupení vzhledem k hmotnosti navážky na zrnitostní analýzu.

Následující tabulky (Tabulka 3, Tabulka 4, Tabulka 5, Tabulka 6, Tabulka 7) obsahují výpočet procentuálního zastoupení částic v daném půdním vzorku.

**Tabulka 3: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 30°, S3**

čas		čtení hustoměru	teplota	teplotní korekce	dynamická viskozita vody	měrná hmotnost vody	hloubka hustoměru	průměr zrna	poměrný obsah částic
t	R <sub>(t)</sub>	T	m	η	ρ <sub>o</sub>	H <sub>(t)</sub>	D <sub>(t)</sub>	O <sub>(t)</sub>	
	[s]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[g.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[mm]	[%]	
0.5 min	30	15.7	24	0.833	0.0093	0.997	13.4	<b>0.068</b>	<b>70.9</b>
1 min	60	15.3	24	0.833	0.0093	0.997	13.6	<b>0.048</b>	<b>69.2</b>
2 min	120	14.5	24	0.833	0.0093	0.997	13.9	<b>0.035</b>	<b>65.9</b>
5 min	300	13.2	24	0.833	0.0093	0.997	14.4	<b>0.022</b>	<b>60.5</b>
10 min	600	12.1	24	0.833	0.0093	0.997	14.9	<b>0.016</b>	<b>55.9</b>
25 min	1500	11.0	24	0.833	0.0093	0.997	15.3	<b>0.010</b>	<b>51.3</b>
50 min	3000	10.2	24.2	0.878	0.0093	0.997	15.7	<b>0.007</b>	<b>48.2</b>
75 min	4500	9.9	24.2	0.878	0.0093	0.997	15.8	<b>0.006</b>	<b>46.9</b>
2.5 h	9000	9.0	24	0.833	0.0093	0.997	16.1	<b>0.004</b>	<b>43.0</b>
24 h	86400	7.6	23.6	0.743	0.0094	0.997	16.7	<b>0.001</b>	<b>36.8</b>
48 h	172800	7.1	23.6	0.743	0.0094	0.997	16.9	<b>0.001</b>	<b>34.7</b>

**Tabulka 4: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 30°, M1**

čas		čtení hustoměru	teplota	teplotní korekce	dynamická viskozita vody	měrná hmotnost vody	hloubka hustoměru	průměr zrna	poměrný obsah částic
t		R <sub>(t)</sub>	T	m	η	ρ <sub>o</sub>	H <sub>(t)</sub>	D <sub>(t)</sub>	O <sub>(t)</sub>
	[s]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[°C]		[g.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[mm]	[%]
0.5 min	30	17.2	22.6	0.526	0.0097	0.997	11.7	<b>0.062</b>	<b>75.2</b>
1 min	60	16.9	22.6	0.526	0.0097	0.997	11.8	<b>0.044</b>	<b>74.0</b>
2 min	120	16.2	22.6	0.526	0.0097	0.997	12.0	<b>0.032</b>	<b>71.1</b>
5 min	300	14.6	22.6	0.526	0.0097	0.997	12.6	<b>0.020</b>	<b>64.5</b>
10 min	600	14.0	22.9	0.590	0.0096	0.997	12.8	<b>0.015</b>	<b>62.3</b>
25 min	1500	12.5	22.9	0.590	0.0096	0.997	13.4	<b>0.009</b>	<b>56.1</b>
50 min	3000	11.6	23.2	0.655	0.0095	0.997	13.7	<b>0.007</b>	<b>52.6</b>
75 min	4500	11.0	23.2	0.655	0.0095	0.997	13.9	<b>0.005</b>	<b>50.1</b>
2.5 h	9000	10.2	23.8	0.788	0.0094	0.997	14.2	<b>0.004</b>	<b>47.4</b>
24 h	86400	8.1	23.9	0.810	0.0094	0.997	15.0	<b>0.001</b>	<b>38.8</b>
48 h	172800	7.9	23.7	0.765	0.0094	0.997	15.1	<b>0.001</b>	<b>37.8</b>

**Tabulka 5: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 34°, M2**

čas		čtení hustoměru	teplota	teplotní korekce	dynamická viskozita vody	měrná hmotnost vody	hloubka hustoměru	průměr zrna	poměrný obsah částic
t	R <sub>(t)</sub>	T	m	η	ρ <sub>o</sub>	H <sub>(t)</sub>	D <sub>(t)</sub>	O <sub>(t)</sub>	
	[s]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[°C]		[g.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[mm]	[%]
0.5 min	30	16.9	24	0.833	0.0093	0.997	12.6	<b>0.064</b>	<b>74.8</b>
1 min	60	16.3	24	0.833	0.0093	0.997	12.8	<b>0.046</b>	<b>72.4</b>
2 min	120	15.7	24	0.833	0.0093	0.997	13.1	<b>0.033</b>	<b>69.9</b>
5 min	300	14.4	24	0.833	0.0093	0.997	13.6	<b>0.021</b>	<b>64.6</b>
10 min	600	13.5	24	0.833	0.0093	0.997	13.9	<b>0.015</b>	<b>60.9</b>
25 min	1500	12.2	24	0.833	0.0093	0.997	14.5	<b>0.010</b>	<b>55.6</b>
50 min	3000	11.4	24.2	0.878	0.0093	0.997	14.8	<b>0.007</b>	<b>52.5</b>
75 min	4500	10.8	24.2	0.878	0.0093	0.997	15.0	<b>0.006</b>	<b>50.0</b>
2.5 h	9000	10.0	24.3	0.901	0.0093	0.997	15.3	<b>0.004</b>	<b>46.8</b>
24 h	86400	8.5	23.6	0.743	0.0094	0.997	15.9	<b>0.001</b>	<b>40.0</b>
48 h	172800	8.2	23.6	0.743	0.0094	0.997	16.1	<b>0.001</b>	<b>38.8</b>

**Tabulka 6: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 30°, M2**

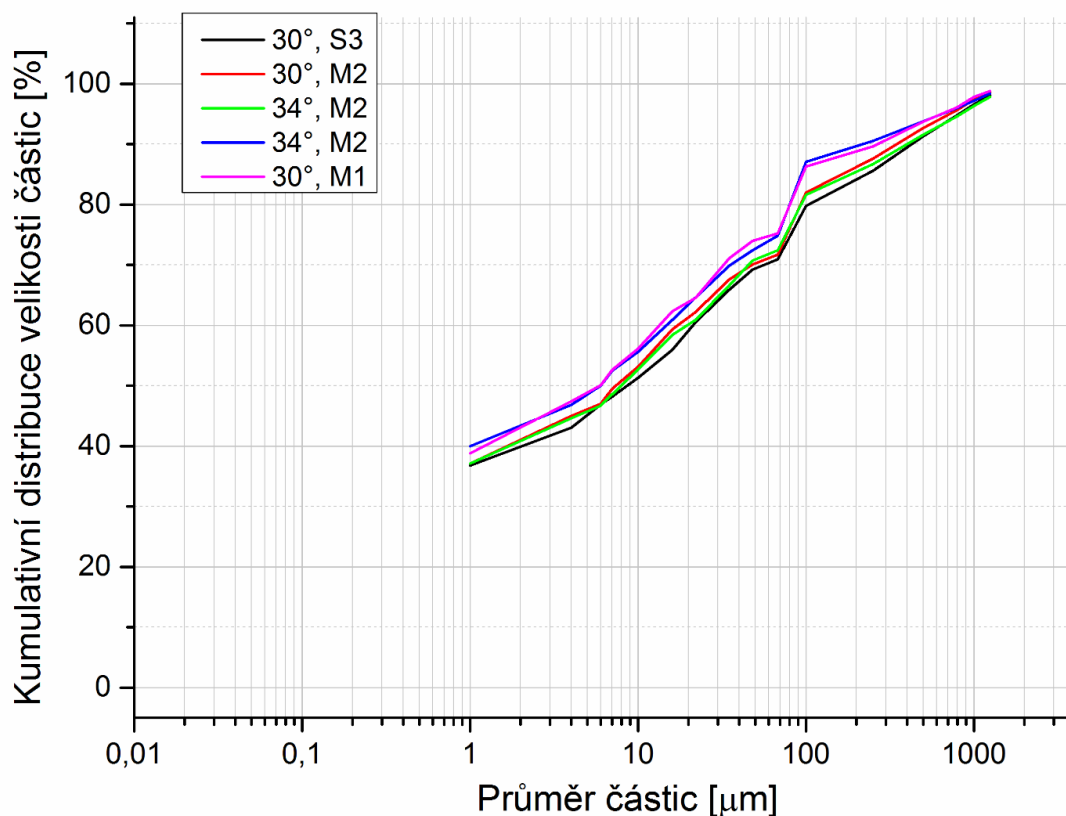
čas		čtení hustoměru	teplota	teplotní korekce	dynamická viskozita vody	měrná hmotnost vody	hloubka hustoměru	průměr zrna	poměrný obsah částic
t		R <sub>(t)</sub>	T	m	η	ρ <sub>o</sub>	H <sub>(t)</sub>	D <sub>(t)</sub>	O <sub>(t)</sub>
	[s]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[°C]		[g.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[mm]	[%]
0.5 min	30	16.0	24	0.833	0.0093	0.997	12.1	0.063	71.7
1 min	60	15.6	24	0.833	0.0093	0.997	12.2	0.045	70.1
2 min	120	15.0	24	0.833	0.0093	0.997	12.5	0.032	67.6
5 min	300	13.7	24	0.833	0.0093	0.997	12.9	0.021	62.2
10 min	600	13.0	24	0.833	0.0093	0.997	13.2	0.015	59.3
25 min	1500	11.5	24	0.833	0.0093	0.997	13.7	0.010	53.1
50 min	3000	10.6	24.1	0.856	0.0093	0.997	14.1	0.007	49.5
75 min	4500	10.0	24.1	0.856	0.0093	0.997	14.3	0.006	47.0
2.5 h	9000	9.5	24.2	0.878	0.0093	0.997	14.5	0.004	45.0
24 h	86400	7.7	23.7	0.765	0.0094	0.997	15.1	0.001	37.1
48 h	172800	7.5	23.6	0.743	0.0094	0.997	15.2	0.001	36.2

**Tabulka 7: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 34°, M2**

čas		čtení hustoměru	teplota	teplotní korekce	dynamická viskozita vody	měrná hmotnost vody	hloubka hustoměru	průměr zrna	poměrný obsah částic
t		R <sub>(t)</sub>	T	m	η	ρ <sub>o</sub>	H <sub>(t)</sub>	D <sub>(t)</sub>	O <sub>(t)</sub>
	[s]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[°C]		[g.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[mm]	[%]
0.5 min	30	16.3	24	0.833	0.0093	0.997	12.0	<b>0.062</b>	<b>72.4</b>
1 min	60	15.9	24	0.833	0.0093	0.997	12.1	<b>0.044</b>	<b>70.7</b>
2 min	120	14.9	24	0.833	0.0093	0.997	12.5	<b>0.032</b>	<b>66.6</b>
5 min	300	13.5	24	0.833	0.0093	0.997	13.0	<b>0.021</b>	<b>60.9</b>
10 min	600	12.9	24	0.833	0.0093	0.997	13.2	<b>0.015</b>	<b>58.4</b>
25 min	1500	11.5	24	0.833	0.0093	0.997	13.7	<b>0.009</b>	<b>52.7</b>
50 min	3000	10.5	24	0.833	0.0093	0.997	14.1	<b>0.007</b>	<b>48.6</b>
75 min	4500	10.0	24.2	0.878	0.0093	0.997	14.3	<b>0.006</b>	<b>46.7</b>
2.5 h	9000	9.5	24.2	0.878	0.0093	0.997	14.5	<b>0.004</b>	<b>44.6</b>
24 h	86400	7.8	23.6	0.743	0.0094	0.997	15.1	<b>0.001</b>	<b>37.1</b>
48 h	172800	7.4	23.6	0.743	0.0094	0.997	15.3	<b>0.001</b>	<b>35.5</b>

Poměrné podíly částic o daném průměru zrn byly zobrazeny jako čára zrnitosti, což je součtová čára vynesena v semilogaritmickém měřítku. (SNĚHOTA, 2018)

V následujícím grafu (Obrázek 13) jsou vyneseny křivky zrnitosti všech pěti vzorků. Křivky jsou si tvarem i hodnotami velmi podobné. Všechny vzorky mají procentuální obsah částic menších než 1 μm téměř 40 %. Procentuální zastoupení částic větších než 100 μm bylo změřeno analýzou na sítích.



Obrázek 13: Zrnitostní křivky půdních vzorků vyhodnocené hustoměrnou zkouškou

### 3.2.4 Přístroj PARIO

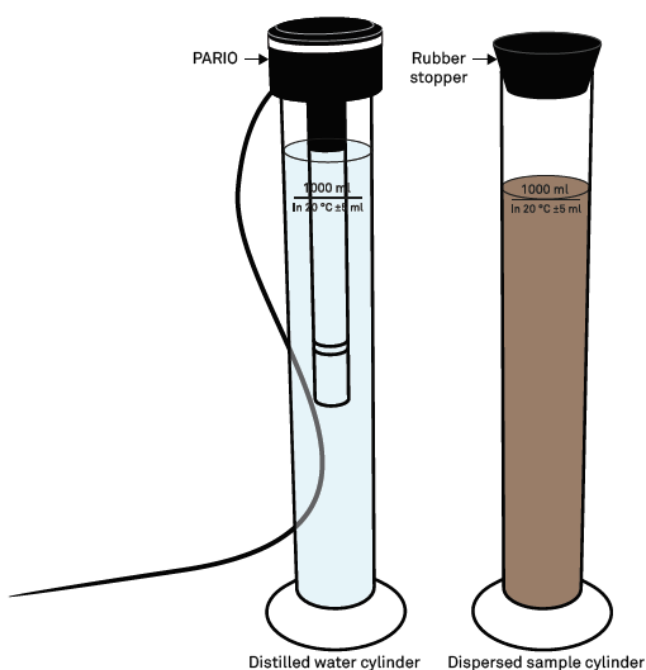
Zrnitostní analýza pěti vybraných půdních vzorků provedená pomocí přístrojů PARIO proběhla v pedologické laboratoři Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Všech pět vzorků bylo analyzováno najednou pěti přístroji PARIO, měření trvalo 8 hodin.

#### 3.2.4.1 Postup měření

Stejně jako u hustoměrné zkoušky byla nutná standardní příprava vzorku, jelikož se jedná o sedimentační metodu měření. Příprava vzorku byla tedy shodná jako příprava pro měření na hustoměru, jejím cílem bylo rozpojení půdních mikroagregátů a oddělení písčité frakce, která byla vyhodnocena analýzou na sítích.

Před začátkem měření bylo nutné nastavit přístroji dobu trvání měření – 8 h, dobu trvání homogenizace (promíchávání suspenze ve skleněném válci) – 60 s, objem suspenze – 1000 ml a hustotu částic půdního vzorku – zjištěno pyknometrem.

První válec byl naplněn 1000 ml destilované vody a druhý 1000 ml suspenzí destilované vody a jemné suspenze půdního vzorku, připraveného již pro hustoměrnou metodu (Obrázek 14). Obsah obou válců dosahoval pokojové teploty, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků měření. Přístroj PARIO byl ponořen do válce s destilovanou vodou po dobu alespoň deseti minut, kde probíhala jeho kalibrace na pokojovou teplotu. Druhý válec byl uzavřen gumovou zátkou a důkladně promícháván po stanovenou dobu 60 s.



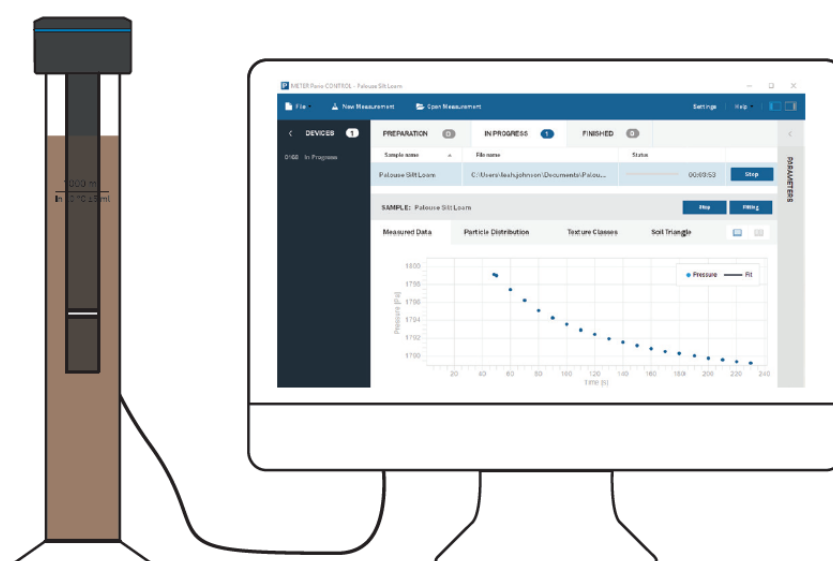
Obrázek 14: Přístroj PARIO – postup měření

Následně byl přístroj PARIO přesunut z prvního do druhého válce a začalo měření, během kterého po dobu 8 hodin přístroj každých 10 vteřin zaznamenával informace o teplotě a tlaku v suspenzi (Obrázek 15, Obrázek 16). Aby mohl software správně vyhodnotit zrnitostní složení

půdního vzorku, bylo nutné zadat hodnoty zjištěné analýzou na sítích (Obrázek 12).



Obrázek 15: Měření zrnitostního složení přístroji PARIO



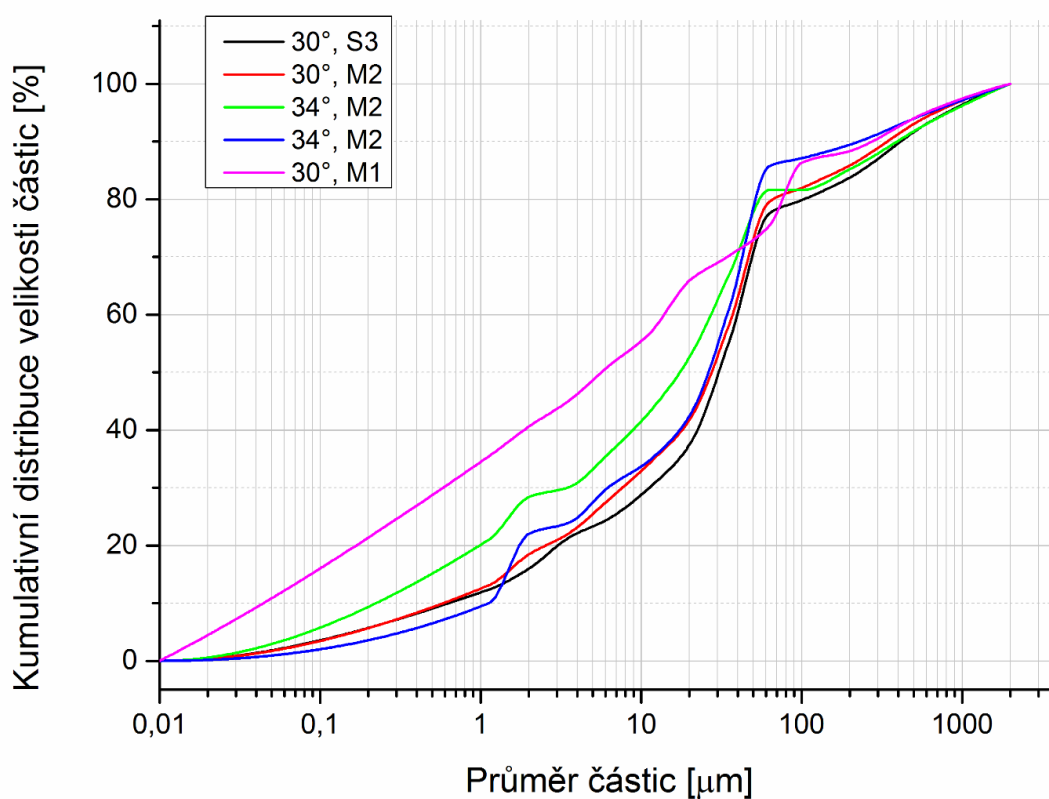
Obrázek 16: Přístroj PARIO a software PARIO Control během měření



### 3.2.4.2 Vyhodnocení měření

Vyhodnocení výsledků měření zpracovává software PARIO Control na základě ISP metody. Všechna generovaná data mohou být exportována včetně grafických znázornění.

Výsledky zrnitostní analýzy přístrojem PARIO jsou vyneseny následujícím grafu (Obrázek 17) jako křivky zrnitosti. Zlom, který nastává kolem 60  $\mu\text{m}$ , je způsobený návazností analýzy na sítě, pro částice větší než 100  $\mu\text{m}$  a křivky vyhodnocené samotným přístrojem PARIO.



Obrázek 17: Zrnitostní křivky půdních vzorků vyhodnocené přístrojem PARIO

## **4 Vyhodnocení výsledků**

Výsledky získané měřením zrnitostního složení půdního sedimentu jsou pro vyhodnocení zobrazeny pomocí grafů jako procentuální distribuce částic nebo jako procentuální kumulativní distribuce částic podle jejich velikosti. Osa x těchto grafů je zobrazena v logaritmickém měřítku.

Nejdříve jsou vyobrazeny a porovnány výsledky získané třemi různými metodami pro stanovení zrnitostní analýzy. Další vyhodnocování už probíhalo pouze na výsledcích, které byly naměřeny laserovým difraktometrem.

Pro porovnávání většího objemu dat (celkem 228 vzorků erodovaného sedimentu měřených laserovým difraktometrem) bylo použito statistického grafického znázornění boxplot. Byly vybrány tři hodnoty velikosti částic pro zobrazení boxplotů, aby bylo možné data mezi sebou vyhodnocovat – 2  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ . Tyto hranice byly zvoleny na základě běžně používaných klasifikačních systémů půd podle jejich zrnitosti. Hodnoty 2  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  určují hranice frakcí trojúhelníkového diagramu (NRCS USDA) a hodnoty 10  $\mu\text{m}$  využívá pro zatřídění půdy klasifikační systém dle Nováka.

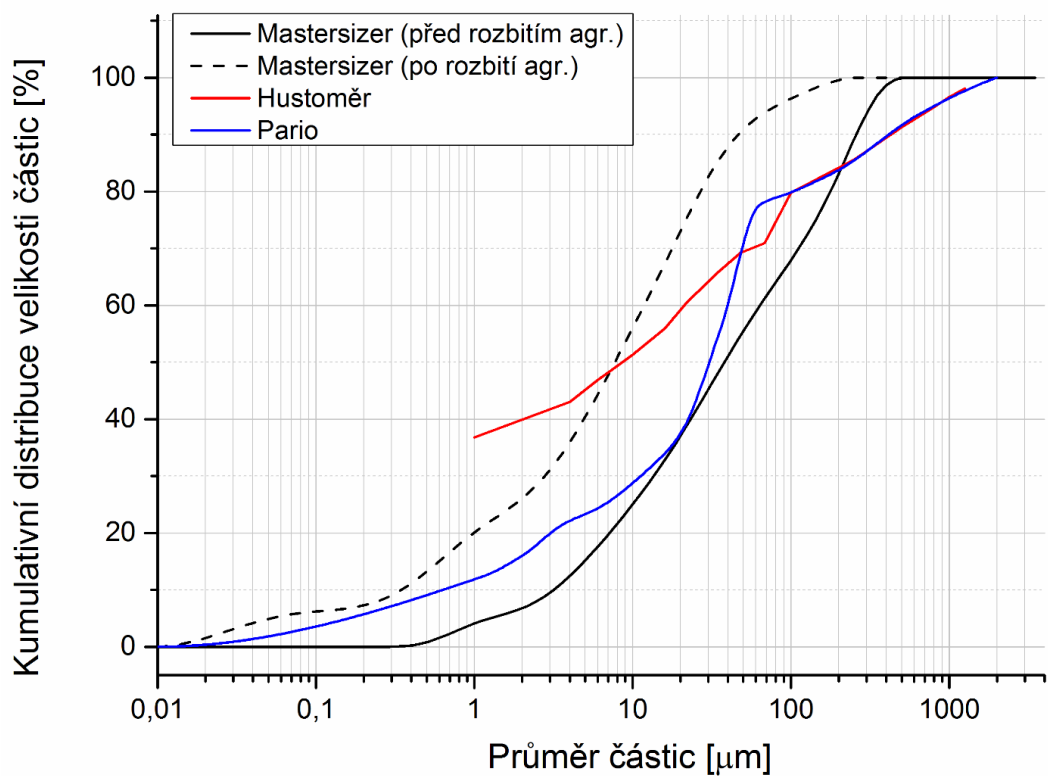
### **4.1 Porovnání použitých metod pro stanovení zrnitostní analýzy**

Na pěti vybraných půdních vzorcích proběhla analýza zrnitostního složení třemi různými metodami (laserový difraktometr Mastersizer 3000, hustoměr a přístroj PARIO), aby bylo možné porovnání těchto metod. Hustoměrnými zkouškami – přístroj PARIO a hustoměr – byly analyzovány naprosto identické části půdních vzorků, obsažené v suspenzích s destilovanou vodou v odměrných válcích, do nichž se přístroj PARIO i hustoměr vkládá.

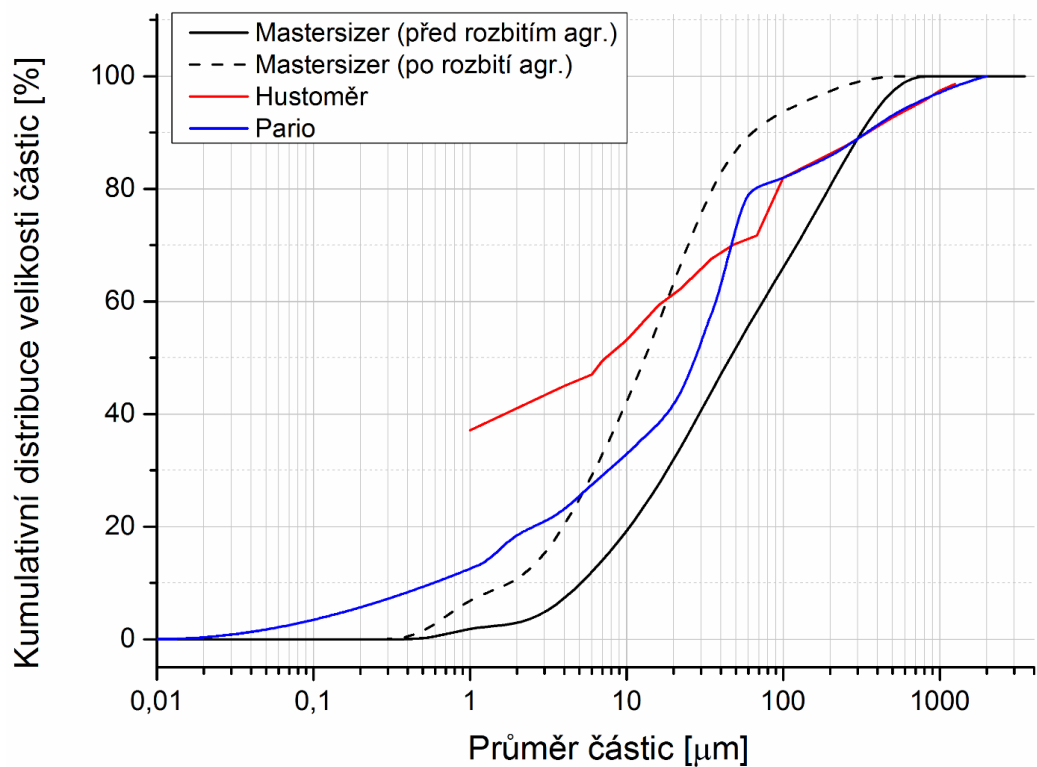
Laserový difraktometr analyzoval zrnitostní složení nejdříve na půdním vzorku obsahujícím agregáty a následně na též půdním vzorku s rozbitými agregáty. Hustoměrné zkoušky jsou založeny na principu Stokesova zákona, který je možné použít pouze pro půdní vzorek bez agregátů. Před zrnitostní analýzou hustoměrem i přístrojem PARIO byly půdní agregáty ve vzorcích půdy rozbity hexametafosforečnanem sodným.

Obsah frakce větší než 100  $\mu\text{m}$  byl pro hustoměrné zkoušky zjištěn měřením na sítích, které proběhlo u každého půdního vzorku společně pro přístroj PARIO i hustoměr, jelikož se vždy jednalo o stále stejný vzorek.

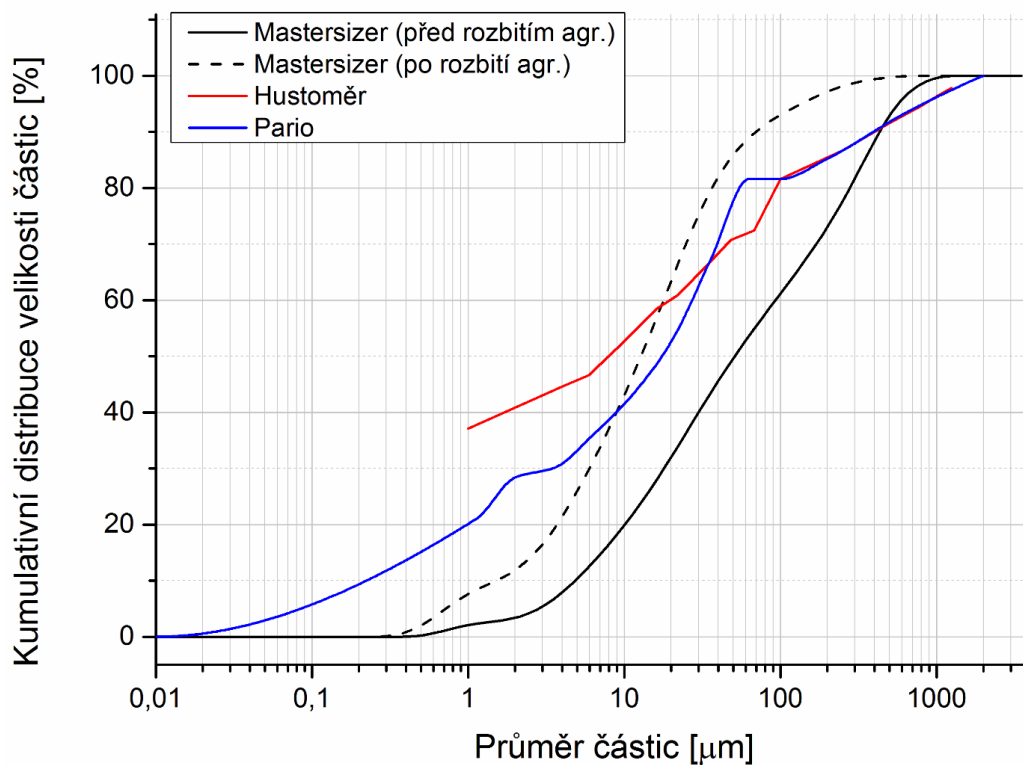
Křivky zrnitosti, které vznikly při prvním měření laserovým difraktometrem, jsou jako jediné analýzou neporušeného půdního vzorku obsahujícího půdní agregáty. Z následujících grafů (Obrázek 18, Obrázek 19, Obrázek 20, Obrázek 21, Obrázek 22) je patrné, že neporušený půdní vzorek obsahuje větší částice než půdní vzorky bez agregátů. Zrnitostní křivky z hustoměrných zkoušek by se měly blížit křivkám z laserového difraktometru po rozbití agregátů, jelikož se ve všech případech jedná o porušené půdní vzorky. Kromě posledního vzorku (Obrázek 22), kde se shodují i hustoměr a přístroj PARIO, tomu tak dle výsledků není. Především zrnitostní křivky z přístroje PARIO se blíží spíše výsledkům z laserového difraktometru před rozbitím agregátů. Výsledky z hustoměrů jsou oproti ostatním nadhodnocené a říkají, že částic jemnějších než 1  $\mu\text{m}$  je ve všech půdních vzorcích téměř 40 %. Tvar zrnitostních křivek z přístroje PARIO je podobný křivkám z laserového difraktometru. Křivky z hustoměru se ale liší, klesají oproti ostatním rovnoměrně.



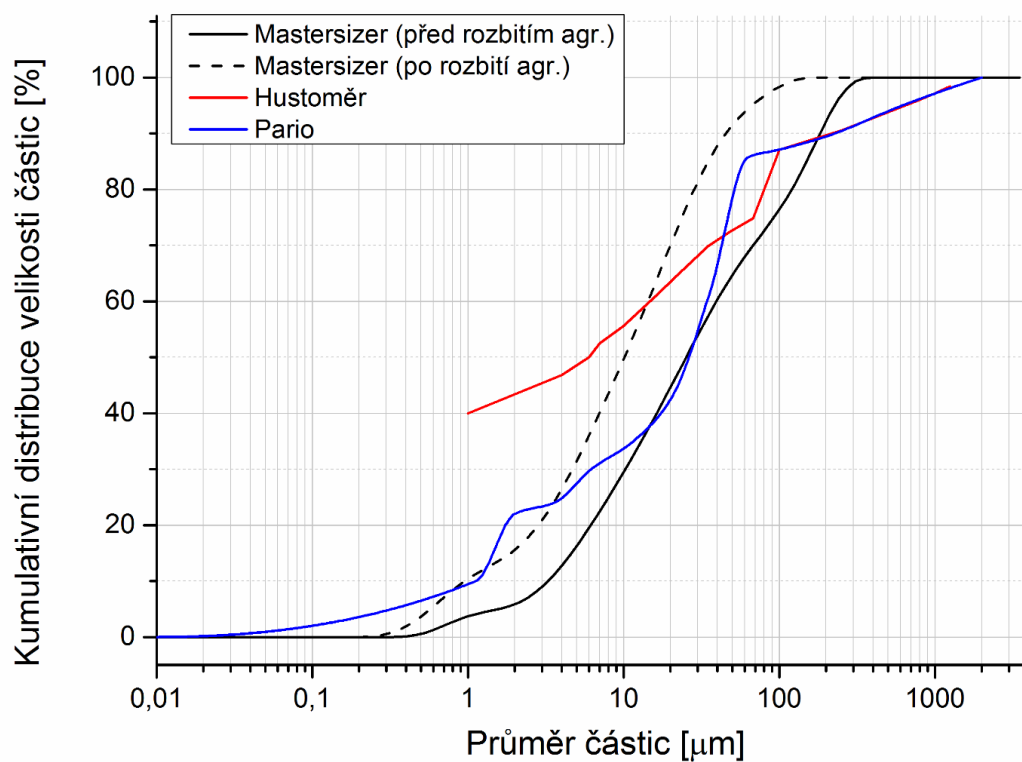
Obrázek 18: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 30°, S3)



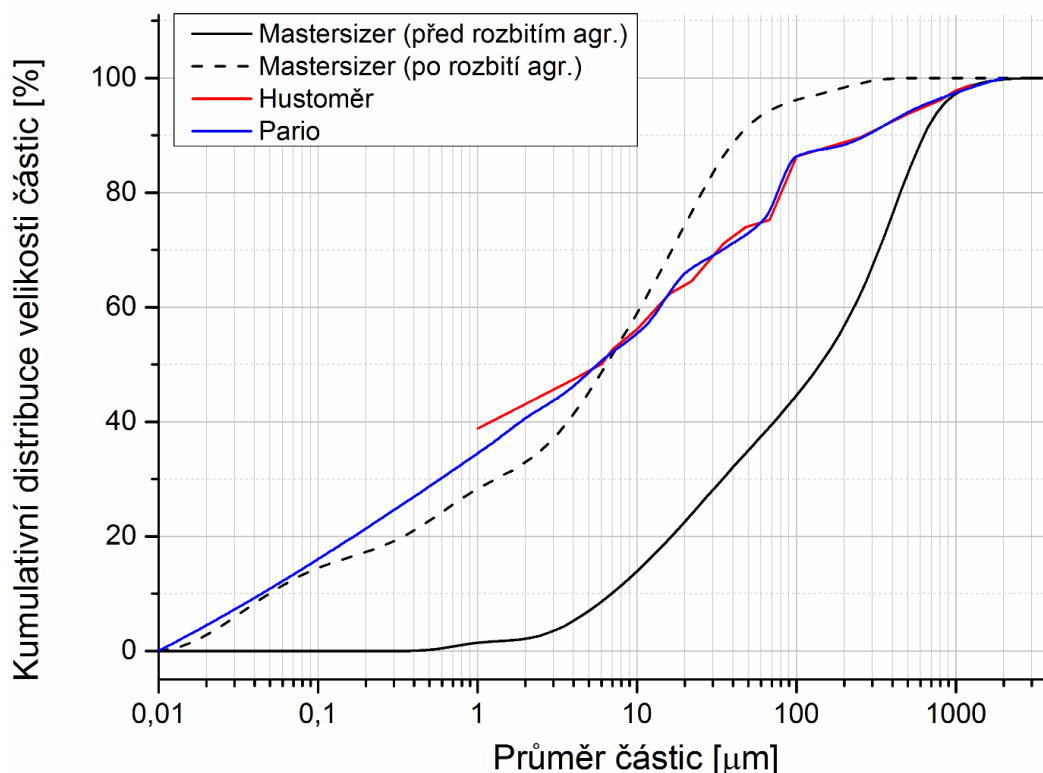
Obrázek 19: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 30°, M2)



Obrázek 20: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 34°, M2)



Obrázek 21: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 34°, M2)



Obrázek 22: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 30°, M1)

V následující tabulce je vyjádřen procentuální podíl částic menších než 10  $\mu\text{m}$  pro všechny zrnitostní křivky zjištěné porovnávanými metodami. Tato hodnota se používá pro zařazení zemin podle Nováka, a proto zde byla použita jako reprezentativní. Z tabulky vyplývá, že pro hodnotu velikosti částic 10  $\mu\text{m}$  se poměrně shodují laserový difraktometr po rozbití agregátů s hustoměrem. Hodnota procentuálního zastoupení částic menších než 10  $\mu\text{m}$  zjištěná přístrojem PARIO se pohybuje mezi hodnotami z laserového difraktometru před rozbitím a po rozbití agregátů.

**Tabulka 8: Procentuální zastoupení částic menších než 10 µm**

	Mastersizer		Hustoměr	PARIO
	s agregáty	bez agregátů	bez agregátů	bez agregátů
sklon kontejneru 30°, S3	25%	56%	51%	29%
sklon kontejneru 30°, M2	19%	42%	53%	32%
sklon kontejneru 34°, M2	20%	42%	53%	41%
sklon kontejneru 34°, M2	29%	50%	56%	34%
sklon kontejneru 30°, M1	14%	59%	57%	57%

Na základě procentuálního zastoupení částic menších než 10 µm byly půdní vzorky zatříděny do kategorií půdního druhu podle Nováka. Půda s agregáty měřená laserovým difraktometrem byla zatříděna jako hlinitopísčité až písčitohlinité. Laserový difraktometr po rozbití agregátů se shodoval vždy buď s výsledkem z hustoměru, nebo z přístroje PARIO, pouze v posledním případě se shodnul s oběma metodami. Půda bez agregátů byla zatříděna do kategorie hlinitá až jílovitohlinitá.

Tabulka 9: Zatřídění vybraných půdních vzorků podle Nováka

	Mastersizer		Hustoměr	PARIO
	s agregáty	bez agregátů	bez agregátů	bez agregátů
sklon kontejneru 30°, S3	Písčitohlinitá	Jílovitohlinitá	Jílovitohlinitá	Písčitohlinitá
sklon kontejneru 30°, M2	Hlinitopísčítá	Hlinitá	Jílovitohlinitá	Hlinitá
sklon kontejneru 34°, M2	Písčitohlinitá	Hlinitá	Jílovitohlinitá	Hlinitá
sklon kontejneru 34°, M2	Písčitohlinitá	Jílovitohlinitá	Jílovitohlinitá	Hlinitá
sklon kontejneru 30°, M1	Hlinitopísčítá	Jílovitohlinitá	Jílovitohlinitá	Jílovitohlinitá

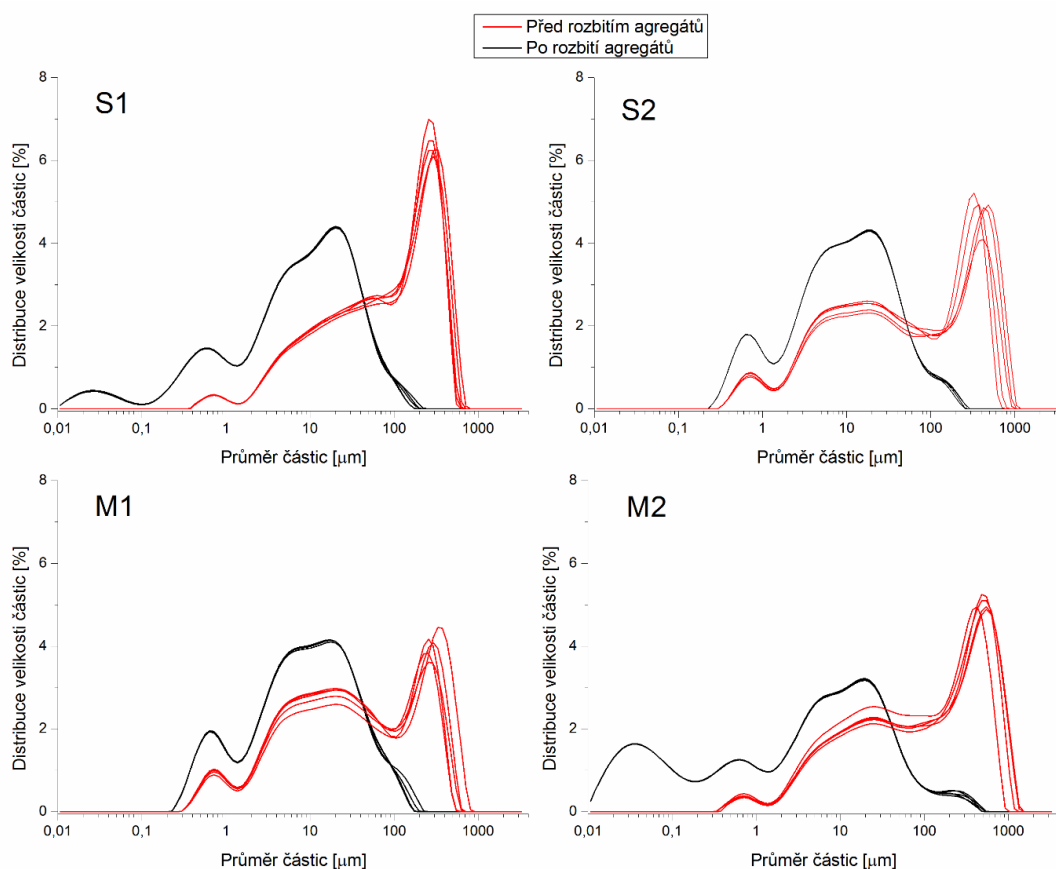
## 4.2 Měření na laserovém difraktometru Mastersizer

### 3000

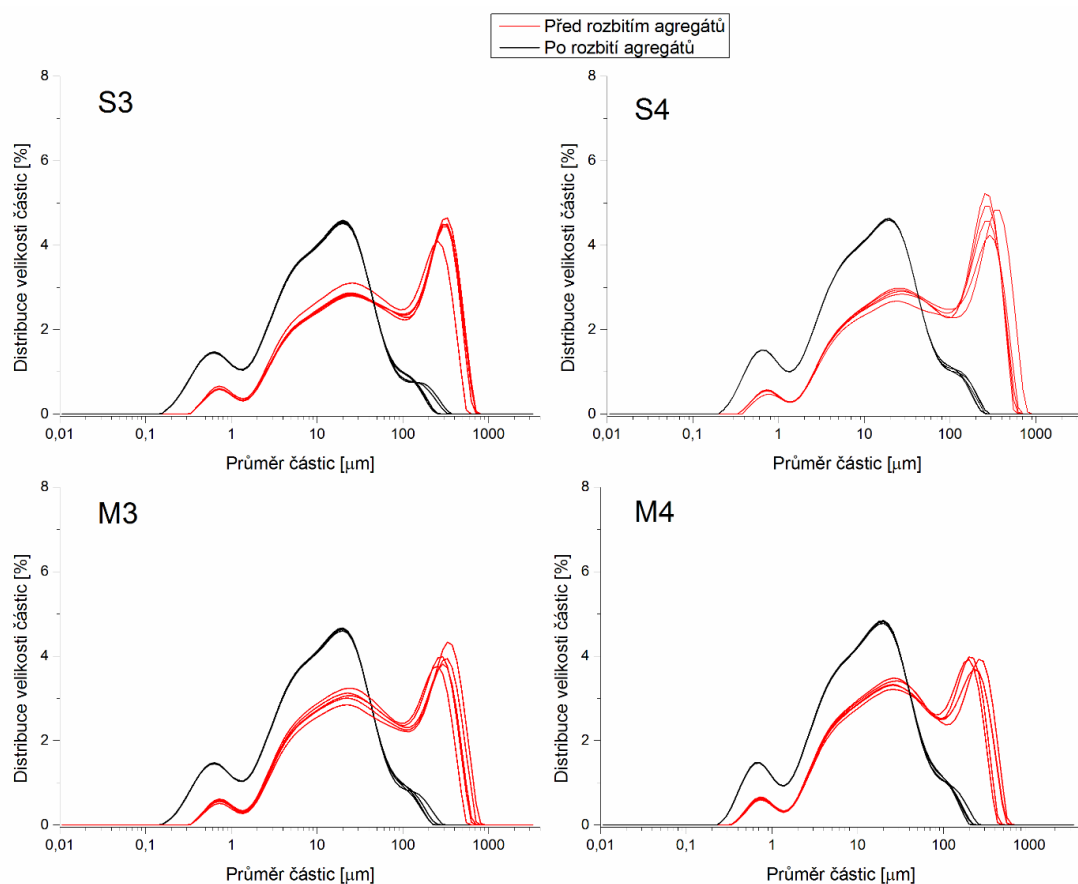
Zrnitostní složení bylo laserovým difraktometrem analyzováno na všech půdních vzorcích z venkovního i laboratorního dešťového simulátoru. Pro každý vzorek bylo vytvořeno 25 záznamů – prvních pět na neporušeném půdním vzorku, poté patnáct během aktivity ultrazvuku a na závěr pět záznamů na půdním vzorku porušeném. Zrnitostní křivky neporušeného půdního vzorku (prvních pět záznamů) mají vždy velmi podobný tvar, pouze se mírně liší hodnotou. Křivky zrnitosti půdního vzorku s rozbitými agregáty (posledních pět záznamů) jsou ve všech případech téměř shodné. Pro další porovnávání zrnitostní analýzy se z daného půdního vzorku použily dvě křivky – průměr z prvních pěti měření a posledních pěti měření.



Obrázky zobrazené níže znázorňují grafy (Obrázek 23, Obrázek 24), kde na každém z nich je vyneseno deset zrnitostních křivek – pět před rozbitím a pět po rozbití agregátů. Z grafů je patrné, že rozptyl mezi křivkami je zanedbatelný, a proto bylo možné pracovat dále jen s jejich průměry. Na grafech je zobrazeno všech osm odběrů půdního vzorku (S1, S2, M1, M2, S3, S4, M3, M4) na venkovní experimentální ploše se sklonem kontejneru 22°.

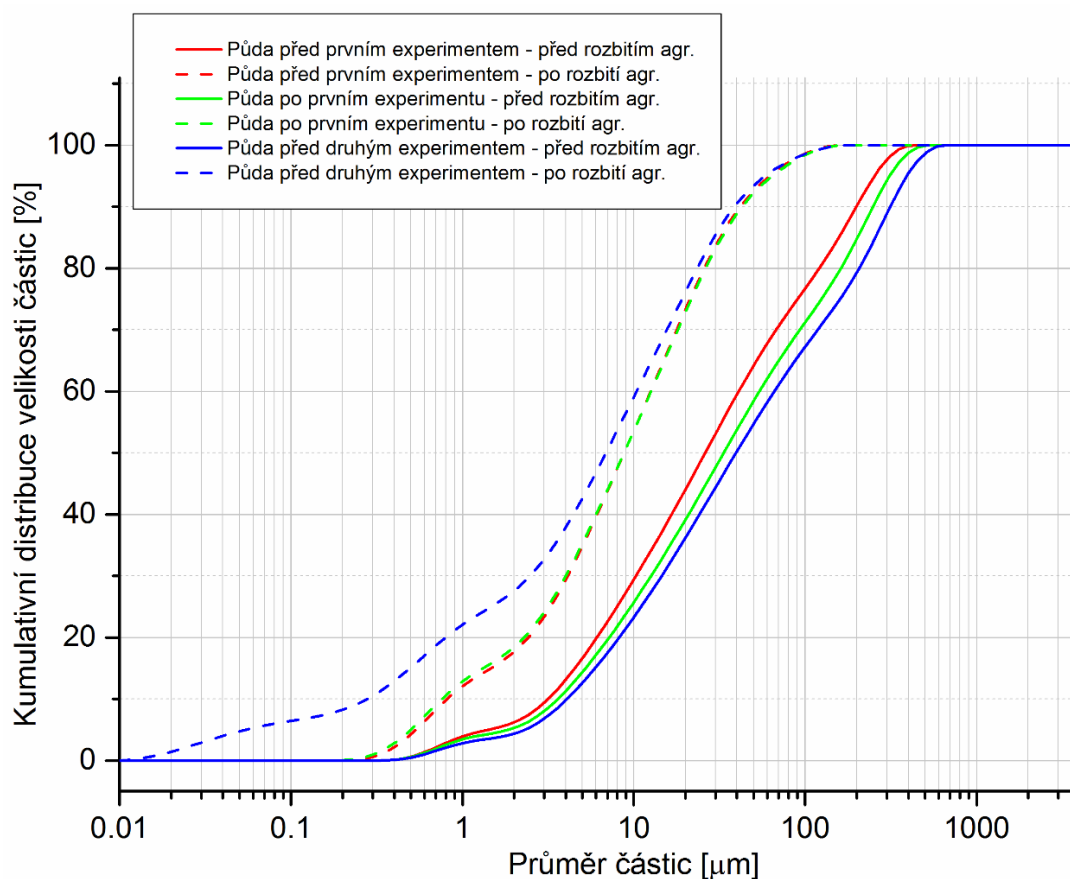


**Obrázek 23: Ukázka variability jednotlivých měření – sklon 22°, první část zadešťování (S1, S2, M1, M2)**



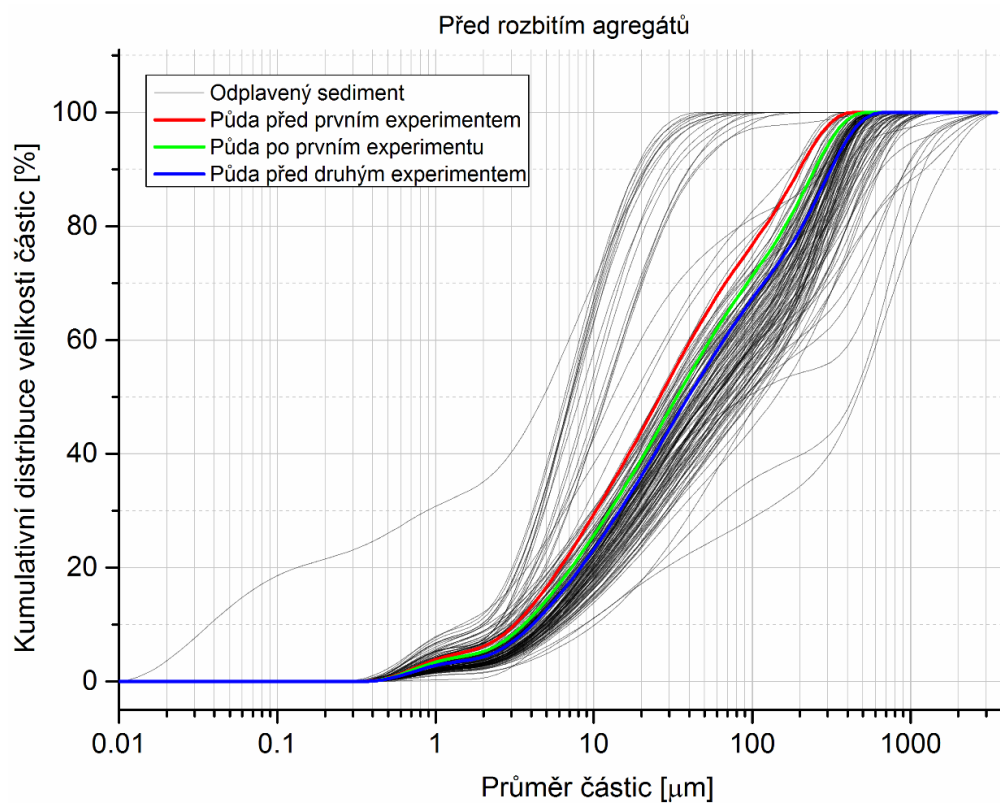
**Obrázek 24: Ukázka variability jednotlivých měření – sklon 22°, druhá část zadešťování (S3, S4, M3, M4)**

Následující graf (Obrázek 25) zobrazuje zrnitostní složení zeminy odebrané přímo z kontejneru v laboratoři. Odběry proběhly tři – před začátkem zadešťování, po prvním experimentu a po druhém experimentu. Před rozbitím půdních agregátů je půda odebraná před začátkem experimentů nejjemnější a půda odebraná po druhém experimentu nejhrubší. Naopak po rozbití agregátů je půda odebraná po druhém experimentu nejjemnější a půda odebraná před experimenty nejhrubší. V průběhu dešťové epizody a erozní události zůstává na experimentální ploše půda hrubší než na jejím počátku. Obsah půdních agregátů se v půdě na kontejneru postupně zvyšuje.

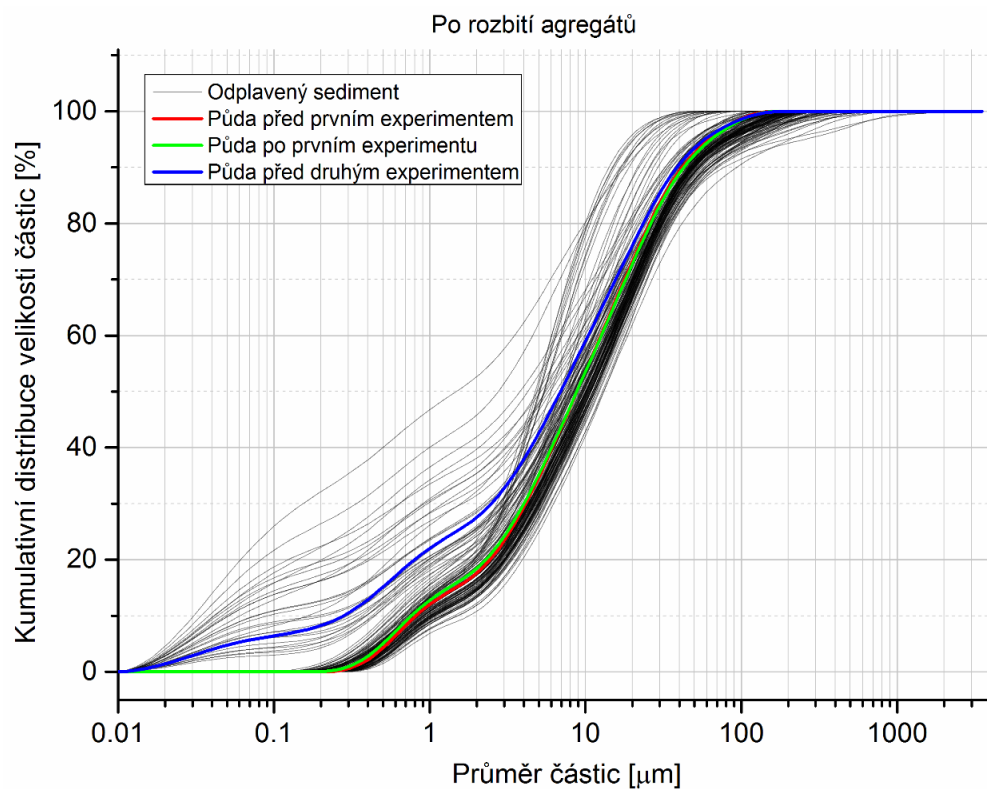


**Obrázek 25: Zrnitostní křivky samotné zeminy – před a po rozbití půdních agregátů**

Grafy níže znázorňují zrnitostní křivky zeminy v porovnání se všemi zrnitostními křivkami erodovaného sedimentu. Před (Obrázek 26) i po (Obrázek 27) rozbití agregátů leží většina zrnitostních křivek erodované půdy napravo od křivek zrnitosti zeminy odebrané přímo na kontejneru, což znamená, že půdní sediment je tvořen hrubšími částicemi než samotná zemina, která se z kontejneru neodplavila.



**Obrázek 26: Porovnání zrnitostních křivek erodovaného sedimentu a samotné zeminy – před rozbitím agregátů**



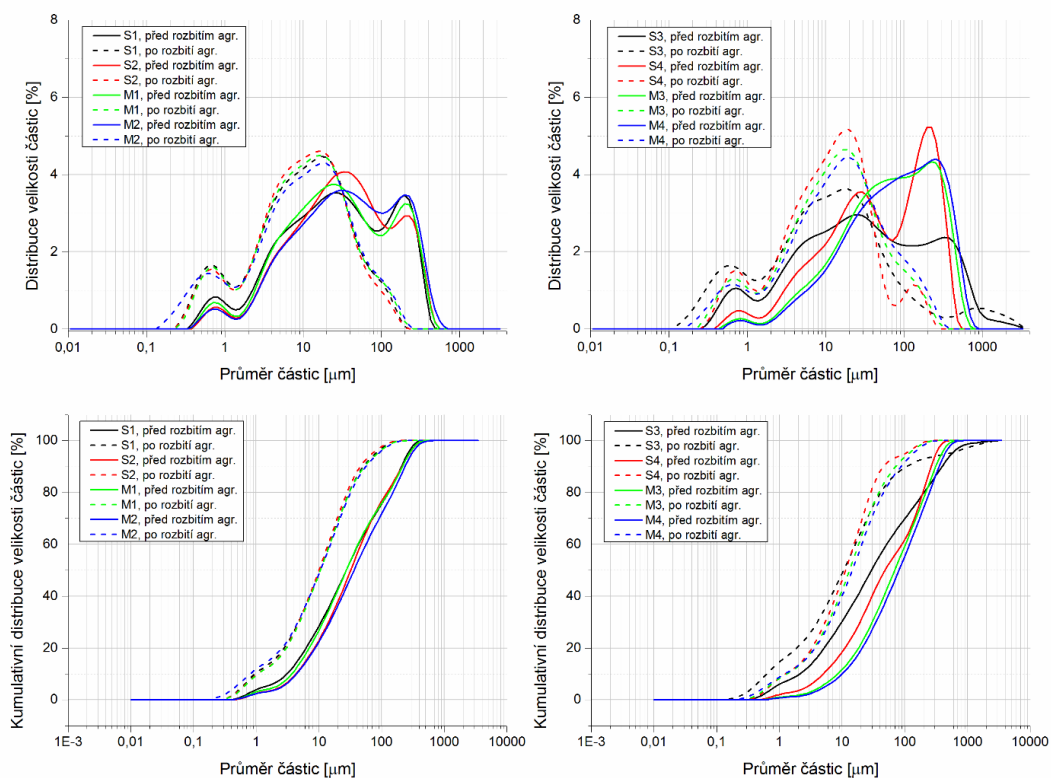
**Obrázek 27: Porovnání zrnitostních křivek erodovaného sedimentu a samotné zeminy – po rozbití agregátů**

#### **4.2.1 Zrnitostní složení půdního sedimentu**

Na obrázcích níže jsou grafy, které vyjadřují distribuci částic i kumulativní distribuci částic půdního vzorku odebraného na třech kontejnerech s různým sklonem – 34° (Obrázek 28), 30° (Obrázek 29) a 22° (Obrázek 30). Na grafech je možné sledovat, jak se velikost částic mění s časem odběru půdního vzorku. Nejprve se vymývají velké částice, poté vlivem odtoku vznikají erozní rýhy. Jakmile je jejich tvorba ustálena, vymývají se už jen částice jemnější. Při odebírání půdních vzorků v prvním časovém intervalu S1 není ještě ustálen odtok, neboť probíhá půdní infiltrace s různou intenzitou. Z tohoto důvodu mohou být křivky zrnitosti pro vzorky S1 v některých případech vychýlené. Dále už je posloupnost křivek zrnitosti pravidelná a velikost částic se s pozdějším časem odběru zmenšuje.

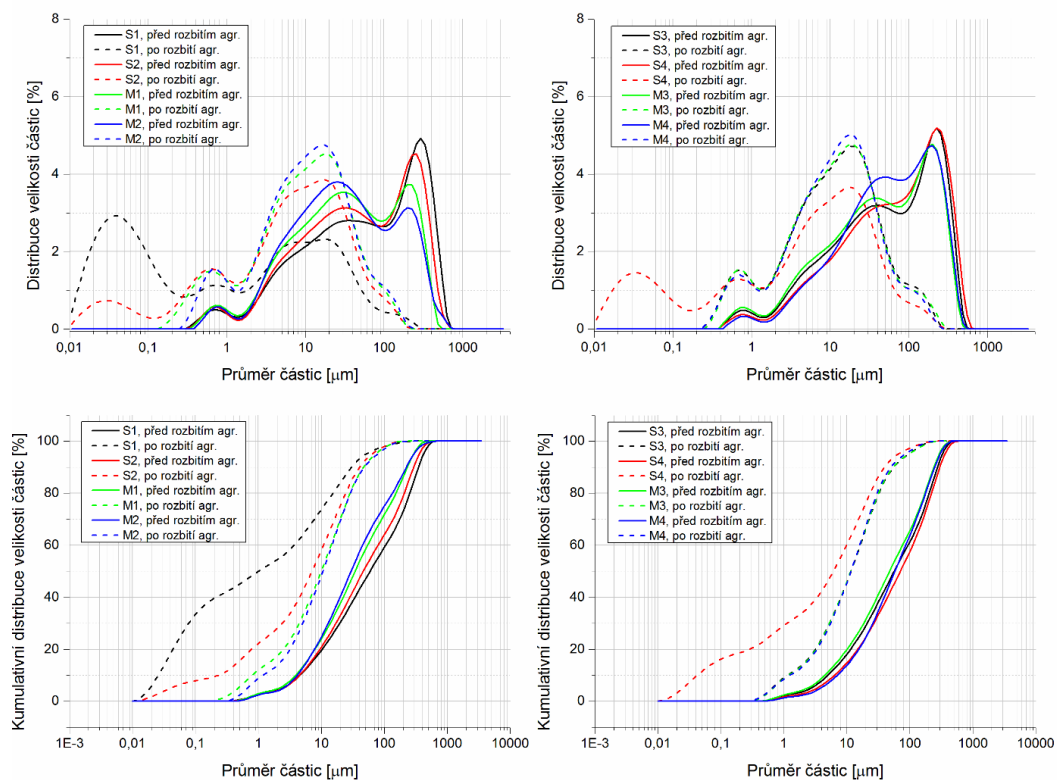
Zrnitostní křivky také ukazují, že po rozbití půdních agregátů ultrazvukem přibývá jemnějších částic, což dokazuje přítomnost půdních agregátů. Půdní vzorky odebrané v kratším čase od počátku deště obsahují větší agregáty než vzorky odebrané později. Je to patrné z rozdílu křivek zrnitosti před a po použití ultrazvuku – čím dříve byl vzorek odebrán, tím větší je rozdíl mezi těmito dvěma křivkami. Půdní agregáty mají nižší měrnou hmotnost než samotná půdní částice, proto na jejich odnos stačí menší energie a jsou odplavovány dříve.

Sklon 34°



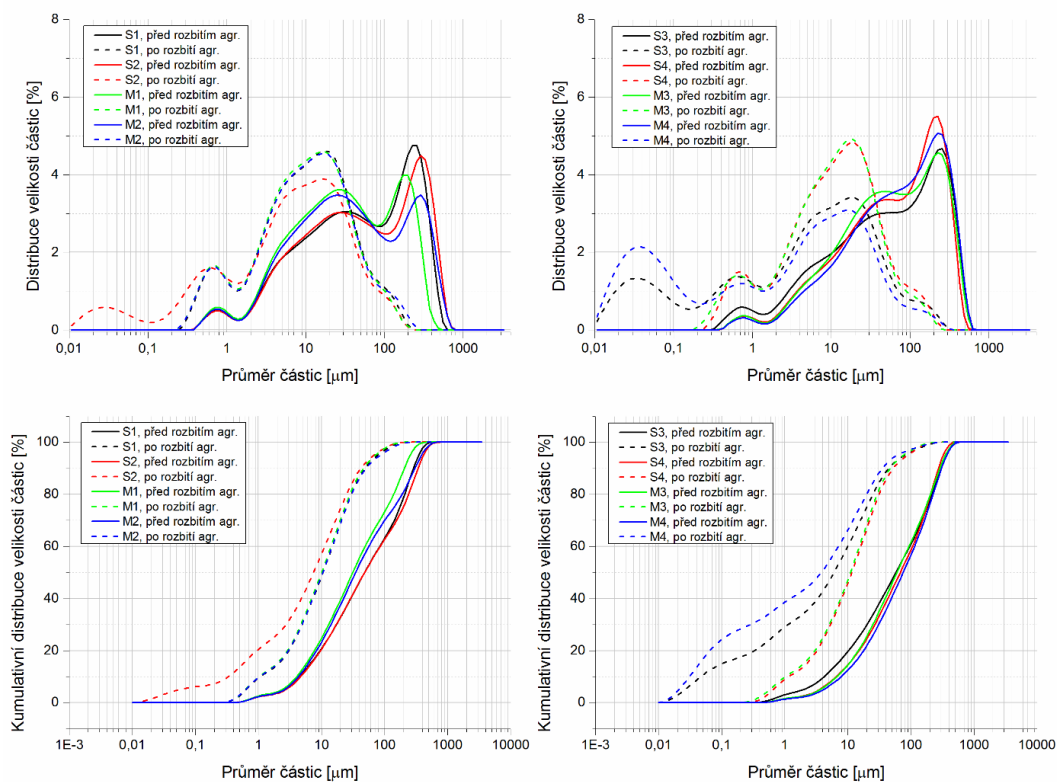
Obrázek 28: Zrnitostní složení půdního sedimentu – sklon kontejneru 34°

Sklon 30°



Obrázek 29: Zrnitostní složení půdního sedimentu – sklon kontejneru 30°

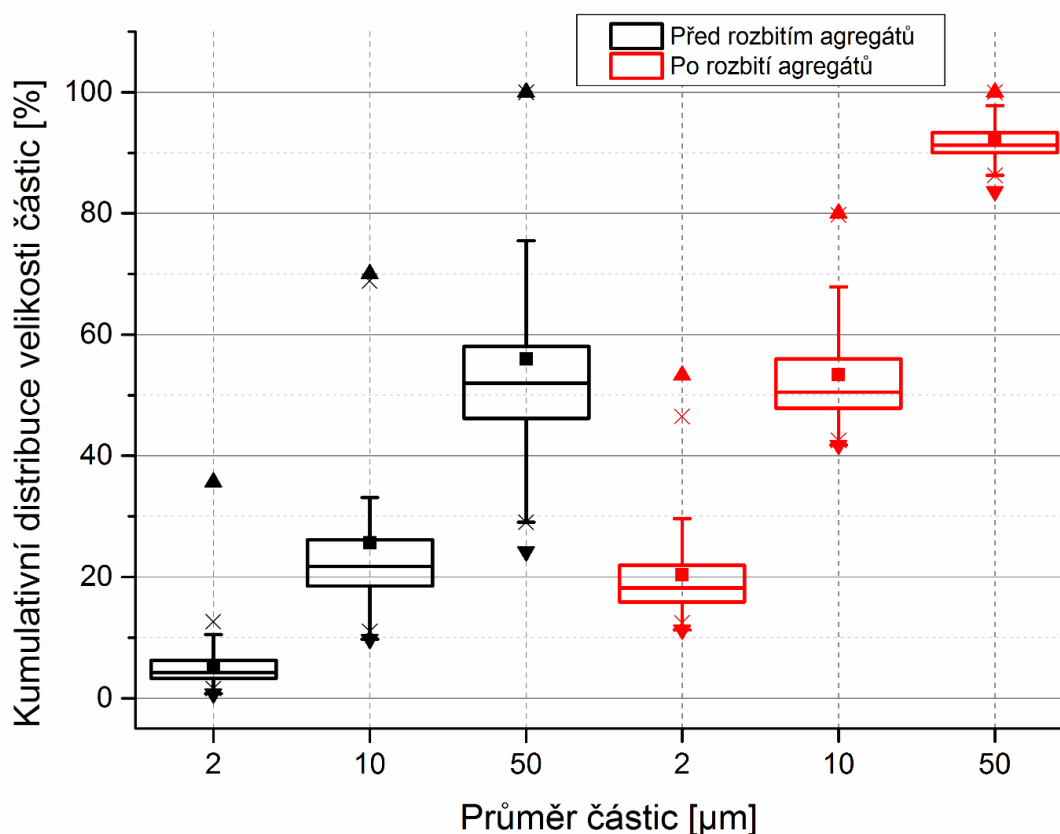
Sklon 22°



Obrázek 30: Zrnitostní složení půdního sedimentu – sklon kontejneru 22°

#### 4.2.2 Zrnitostní složení v závislosti na přítomnosti půdních agregátů

Obrázek 31 znázorňuje pomocí boxplotů porovnání veškerých naměřených zrnitostních křivek půdy s agregáty a půdy bez agregátů.



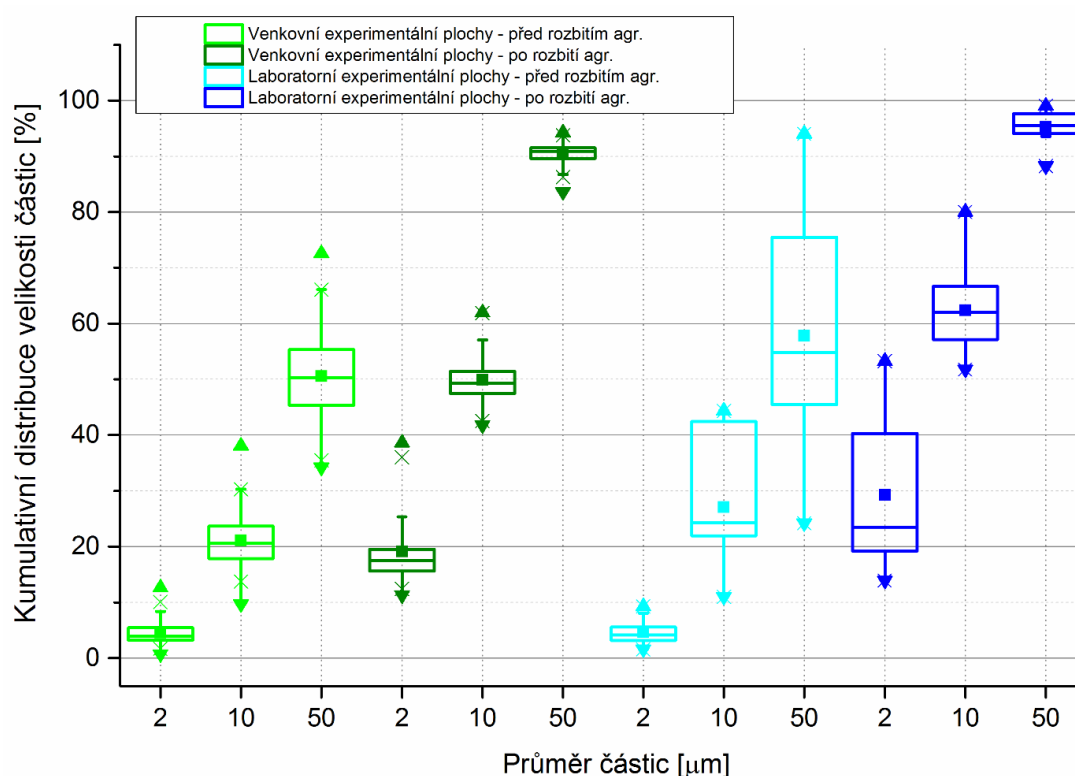
Obrázek 31: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu před rozbitím agregátů a po rozbití agregátů

Z grafu je patrné, že křivky zrnitosti půdy po rozbití agregátů mají menší rozptyl než křivky před rozbitím agregátů. Zároveň půda bez agregátů obsahuje jemnější částice než půda s agregáty. Zrn větších než 50  $\mu\text{m}$  je v půdě s agregáty v průměru lehce přes 40 %, kdežto v půdě bez agregátů méně než 10 %. Poměr zrn menších než 2  $\mu\text{m}$  je v sedimentu s agregáty necelých 10 % a v půdě bez agregátů kolem 20 %.



### 4.2.3 Porovnání zrnitostního složení půdního sedimentu z venkovních a laboratorních experimentálních ploch

Následující graf (Obrázek 32) znázorňuje pomocí boxplotů křivky zrnitosti půdního sedimentu odebraného na venkovních experimentálních plochách v porovnání s křivkami zrnitosti sedimentu z laboratorních experimentů.

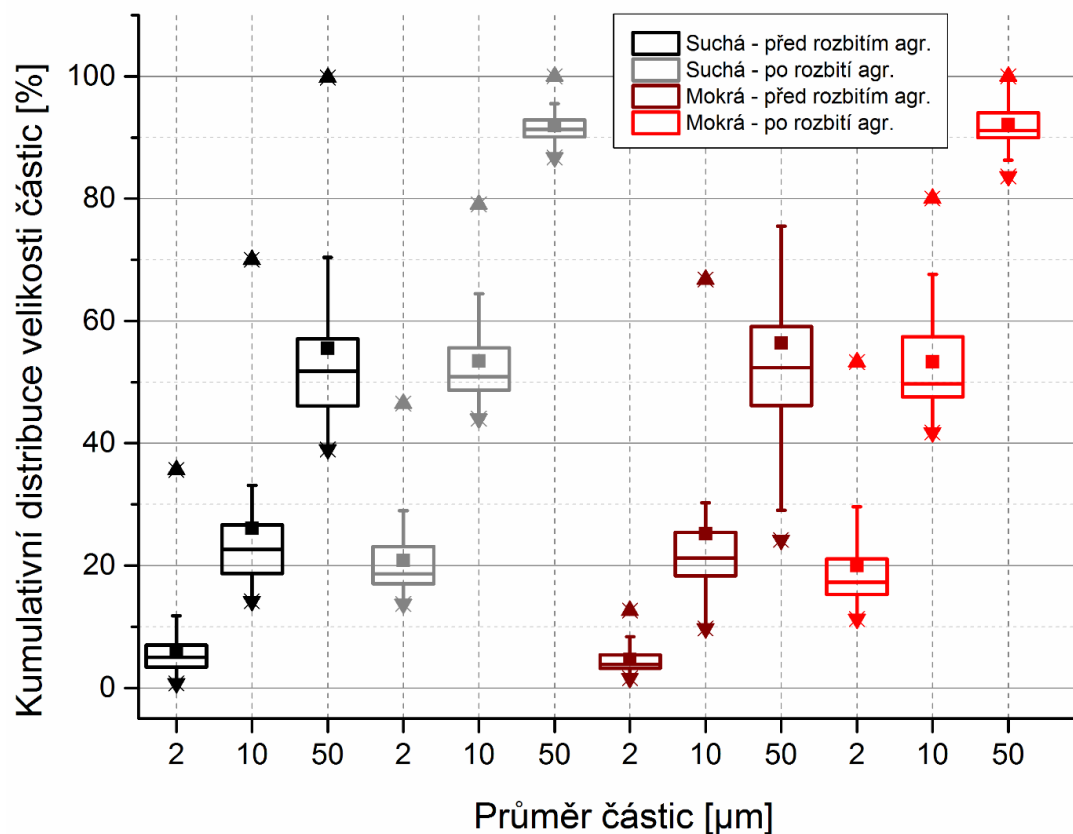


Obrázek 32: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu z venkovního a laboratorního dešťového simulátoru

Zrnitostní křivky půdy z laboratorních experimentálních ploch mají mnohem větší rozptyl než křivky z venkovních měření, a to před rozbitím i po rozbití půdních agregátů. Může to být způsobené množstvím dat, které bylo z laboratorních měření menší než z měření venkovních. V celkovém průměru je sediment z ploch laboratorních jemnější oproti sedimentu z venkovních ploch.

#### 4.2.4 Porovnání zrnitostního složení suché a mokré varianty

Na grafu níže (Obrázek 33) jsou vyobrazeny boxploty všech zrnitostních křivek půdních vzorků odebraných jako suchá varianta a mokrá varianta.

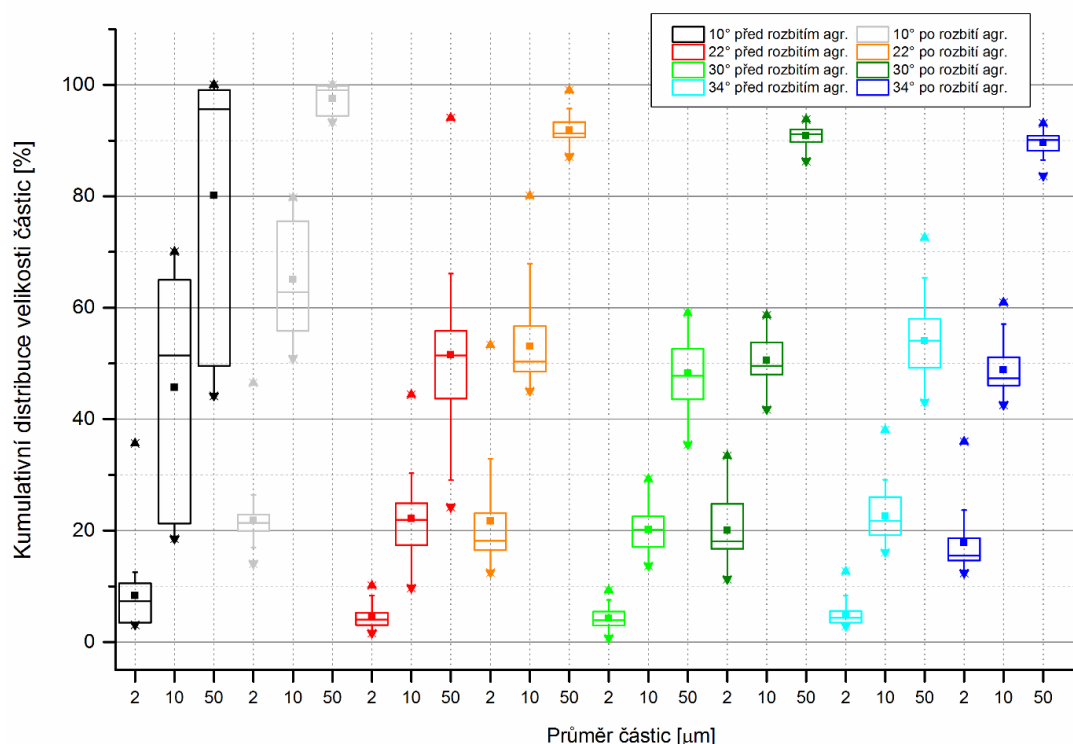


Obrázek 33: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu suché a mokré varianty

Z grafu je zřejmé, že rozdíl v poměrném zastoupení velikostí částic mezi suchými a mokрыmi variantami je velmi malý, průměrné hodnoty pro všechny velikosti zrn se pro obě varianty liší jen nepatrně. Rozptyl křivek je také pro suchou a mokrou variantu téměř shodný.

#### 4.2.5 Zrnitostní složení v závislosti na sklonu kontejneru

Byl prověřen vliv sklonu kontejneru s půdou na zrnitostní složení sedimentu. Porovnání zrnitostních křivek z jednotlivých sklonů experimentálních ploch je znázorněno na grafu níže (Obrázek 34).



Obrázek 34: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu na různých sklonech kontejnerů

Rozptyl křivek pro sklon 10° je výrazně větší než ostatní rozptyly, zároveň jsou částice vymývané na sklonu 10° jemnější než částice z ostatních sklonů. Před rozbitím půdních agregátů je pro sklon 10° množství částic větších než 50 μm pouze 20 %, zatímco pro sklony 22°, 30° a 34° je to okolo 45 %. Po rozbití agregátů je rozdíl ve velikosti částic menší, nejvýraznější je pro hodnotu 10 μm. Částice, které jsou větší než 10 μm, zastávají na sklonu 10° 35 % a na zbylých sklonech zhruba 50 % z celkového objemu. Čím je sklon mírnější, tím menší má odtok energii k uvolnění a odnosu půdních částic, proto je půdní sediment odebraný na sklonu 10° jemnější a obsahuje méně půdních agregátů než ze svahů prudších.

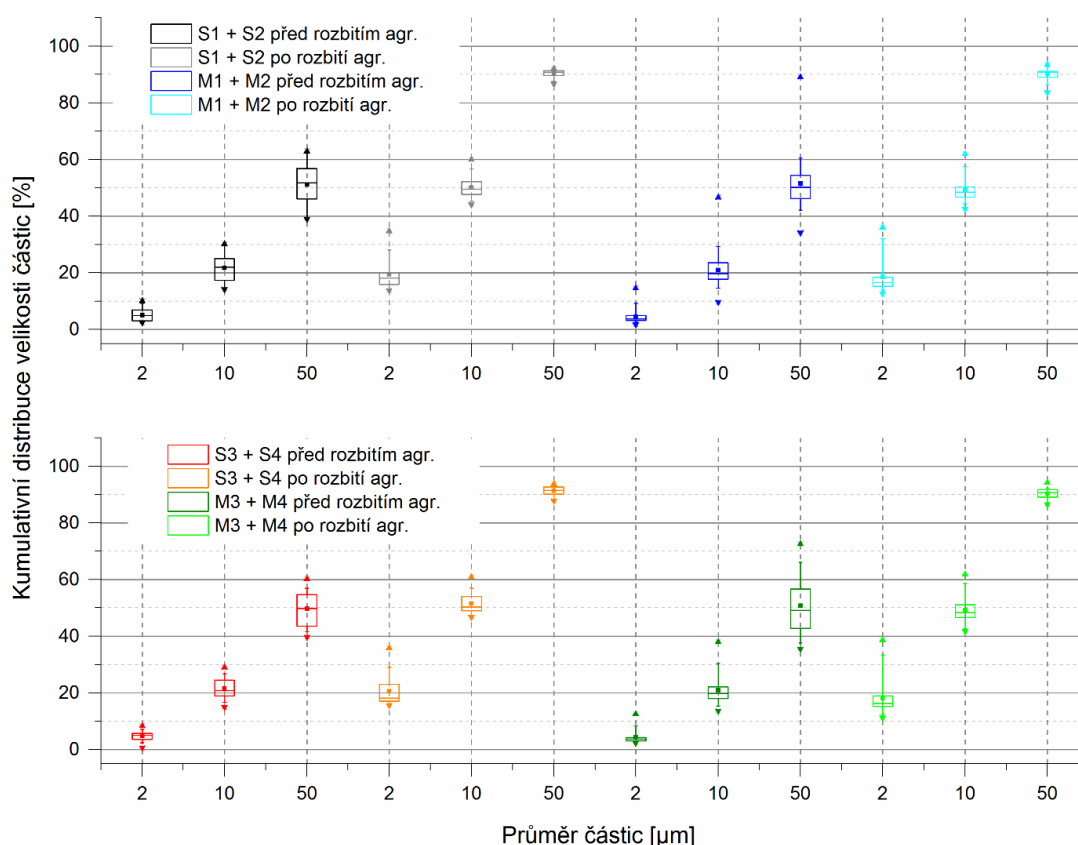
Zrnitostní křivky pro sklony 22°, 30° a 34° jsou si podobné, avšak určité difference patrné jsou. Rozdíl poměrného zastoupení velikosti částic půdy před rozbitím a po rozbití agregátů je nejmenší na sklonu 34°, nejlépe patrné je to pro hodnotu 10 μm – zhruba 26 % na sklonu 34°, pro sklon 22° a 30° je to 30 %, ale děje se tak i pro hodnoty 2 μm a 50 μm.

Znamená to, že při sklonu kontejneru 34° se v půdním sedimentu vyskytuje nejméně půdních agregátů v porovnání s ostatními dvěma sklony.

#### 4.2.6 Zrnitostní složení v závislosti na času od počátku deště

##### – venkovní experimentální plochy

Jak již bylo vysvětleno výše (viz kapitola 3.1.1.1), na venkovních experimentálních plochách byly půdní vzorky odebírány v osmi časových intervalech (S1, S2, M1, M2, S3, S4, M3, M4). Pro určení vlivu času odběru byly křivky zrnitosti sloučeny do čtyř variant – S1+S2, M1+M2, S3+S4, M3+M4 – a byly vytvořeny grafy, na kterých boxploty tyto křivky znázorňují (Obrázek 35).



Obrázek 35: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu suché a mokré varianty na venkovních experimentálních plochách

Z grafu nejsou rozdíly v zrnitostním složení způsobené časem odběru vzorku téměř patrné. Pro lepší vyhodnocení hodnot, které se liší jen velmi

málo, byly vytvořeny dvě tabulky, které prezentují průměrné hodnoty zobrazené boxploty.

Průměrné procentuální zastoupení částic menších než je daná velikost (2  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ ) je znázorněno v následující tabulce (Tabulka 10). Velikost částic je na suché půdě (S1 + S2) větší než při odběrech na půdě plně nasycené (M1 + M2). Po desetidenní pauze, kdy první odběr vzorku probíhá opět na suché půdě (S3 + S4), velikost částic opět lehce vzroste a při dalším odběru na mokré půdě (M3 + M4) znovu klesne. Stejně výsledky můžeme pozorovat i po rozbití půdních agregátů.

**Tabulka 10: Průměrné procentuální zastoupení částic dané velikostní třídy z venkovních experimentálních ploch**

%		2 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Před rozbitím půdních agregátů	S1 + S2	5.21	21.79	49.00
	M1 + M2	4.35	20.64	49.48
	S3 + S4	4.95	21.72	51.04
	M3 + M4	4.65	21.91	53.09
Po rozbití půdních agregátů	S1 + S2	19.90	51.15	91.13
	M1 + M2	18.32	48.92	89.94
	S3 + S4	19.11	49.76	90.33
	M3 + M4	17.41	48.55	89.98

V tabulce níže (Tabulka 11) je znázorněno, o kolik procent se liší průměrné procentuální zastoupení dané velikosti částic před a po rozbití půdních agregátů pro různé časy odběru vzorku. Z tabulky je patrné, že s pozdějším intervalem odběru se rozdíl snižuje. Čím menší je rozdíl, tím méně půdních agregátů vzorek obsahuje. Půdní sediment odplavený na počátku dešťové epizody obsahuje větší množství agregátů než vzorky odebrané později.

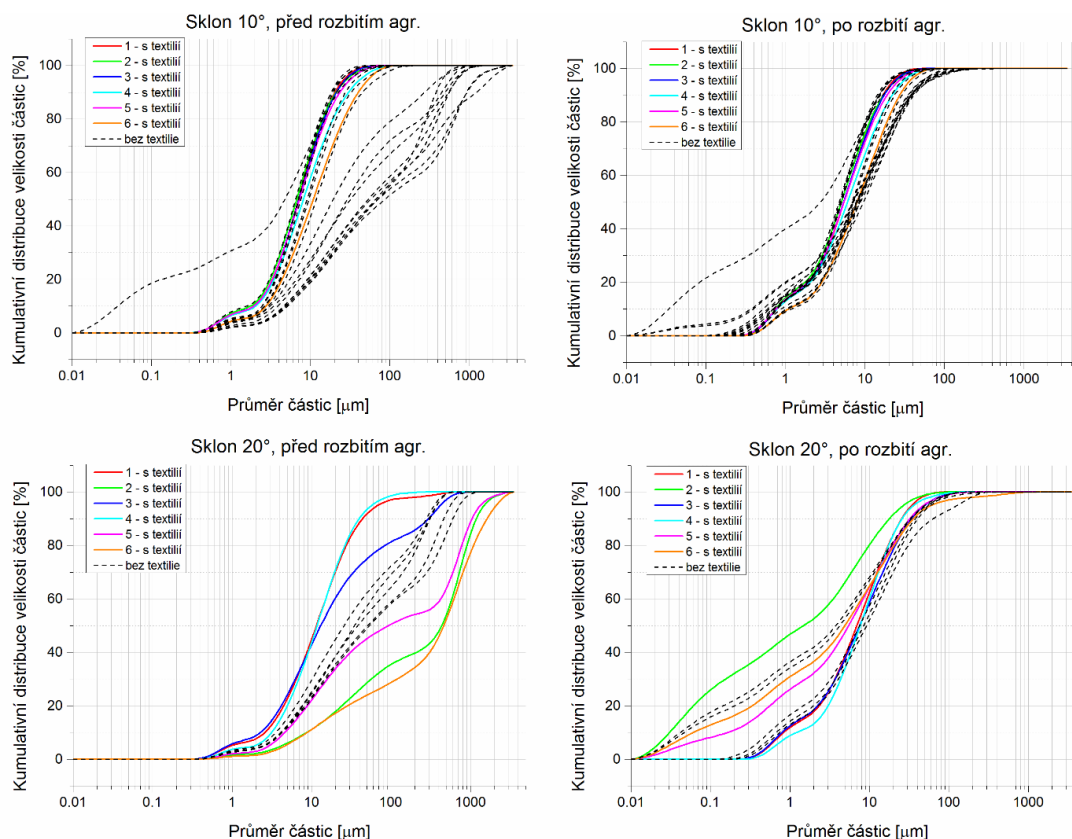
**Tabulka 11: Rozdíl procentuálního zastoupení částic dané velikostní třídy před a po rozbití půdních agregátů**

%	2 μm	10 μm	50 μm
S1 + S2	14.70	29.36	42.13
M1 + M2	13.97	28.27	40.47
S3 + S4	14.16	28.04	39.29
M3 + M4	12.76	26.64	36.89

#### **4.2.7 Zrnitostní složení v závislosti na použitém technickém protierozním opatření**

Všechna použitá technická protierozní opatření ve formě geotextilií bez ohledu na jejich typ mají pozitivní vliv na množství odtoku a množství sedimentu. Odtok je na půdě s textilií v průměru o 40 % nižší než na půdě bez textilie. Množství odneseného sedimentu je díky textilii více jak trojnásobně nižší než na půdě bez opatření. (KAVKA, 2018)

Vliv použití protierozní geotextilie na zrnitostní složení sedimentu byl zkoumán na laboratorních experimentálních plochách. Následující graf (Obrázek 36) zobrazuje křivky zrnitosti půdy s ochrannou geotextilií (polyamidové vlákno Enkamat 7010) v porovnání s půdou bez geotextilie. Zrnitostní křivky sedimentu erodovaného na půdě s geotextilí jsou označeny čísly 1-6 podle pořadí, v jakém byly odebírány.



**Obrázek 36: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu na půdě s ochranou textilií a bez textilie**

Pro sklon kontejneru 10° je zrnitost erodovaného sedimentu na plochách bez protierozních opatření viditelně hrubší oproti zrnitosti sedimentu na plochách s opatřeními. Zároveň se velikost částic sedimentu na plochách s opatřeními s pozdějším časem odběru snižuje. Na sklonu kontejneru 20° lze pozorovat velký rozdíl mezi křivkami před a po rozbití půdních agregátů na půdních vzorcích 1 a 4. Oba tyto vzorky jsou odebrány na počátku dešťové epizody – vzorek 1 jako suchá varianta a vzorek 4 po patnáctiminutové pauze bez deště jako varianta mokrá. Tento rozdíl značí přítomnost velkého množství půdních agregátů v erodovaném sedimentu na počátku povrchového odtoku. Další souvislosti na sklonu 20° mezi zrnitostí sedimentu z ploch s opatřeními a bez nich nebo mezi časem odběru vzorku na plochách s opatřeními a jeho zrnitostním složením lze jen těžko interpretovat. Pro tento experiment nebylo k dispozici dostatečné množství půdních vzorků, aby mohly být výsledky relevantní.

## 5 Závěr a doporučení

Byly použity a porovnány tři metody pro stanovení zrnitostního složení půdního sedimentu. Laserovým difraktometrem lze vyhodnocovat zrnitost na porušeném i neporušeném půdním vzorku, zatímco hustoměrem a přístrojem PARIO pouze na vzorku porušeném, tedy bez půdních agregátů. Na pěti analyzovaných půdních vzorcích bylo porovnáno procentuální zastoupení částic menších než 10  $\mu\text{m}$  – hranice pro klasifikaci půdy podle Nováka. Výsledky získané laserovým difraktometrem a hustoměrem se liší v průměru o 7 %, laserovým difraktometrem a přístrojem PARIO o 11 % a hodnoty z hustoměru a přístroje PARIO jsou rozdílné v průměru o 15 %. Množství částic menších než 10  $\mu\text{m}$  udává přístroj PARIO vždy nižší než hustoměr nebo laserový difraktometr.

Časová náročnost těchto metod se velmi liší. Pro stanovení zrnitosti hustoměrem i přístrojem PARIO je nejprve nutná standardní příprava vzorku, aby byly rozrušeny půdní agregáty a oddělila se jemná frakce od pískové. Tato příprava trvá pro jeden vzorek zhruba 25 minut. Dále je potřeba pro pískovou frakci každého vzorku provést analýzu na sítích, která zabere zhruba 10 minut. Samotné měření hustoměrem probíhá 48 hodin a přístrojem PARIO 8 hodin. Analýza zrnitosti laserovým difraktometrem nevyžaduje žádnou předchozí přípravu půdního vzorku kromě jeho důkladného promíchání. Poté přístroj měří zrnitostní složení, což u jednoho vzorku trvá necelých 15 minut. Vyhodnocení zrnitosti všech 228 vzorků laserovým difraktometrem trvalo 57 hodin. Pokud by pro zrnitostní analýzu všech vzorků bylo použito přístroje PARIO, celková doba měření by byla 1957 hodin a vyhodnocování hustoměrem by zabralo dokonce 11077 hodin, což je téměř 462 dnů.

Nezanedbatelnou výhodou zrnitostní analýzy laserovým difraktometrem je množství vzorku, které přístroj k vyhodnocení



potřebuje. Zatímco pro měření hustoměrem i přístrojem PARIO musí být hmotnost půdního vzorku minimálně 50 g, laserovému difraktometru stačí přibližně 1 g. Tato přednost je přínosná především při porovnávání vlivu různých protierozních opatření na zrnitostní složení sedimentu, v tomto případě protierozních geotextilií, protože objem sedimentu je z takto opatřených experimentálních ploch trojnásobně menší než z ploch bez opatření. Vliv protierozních opatření na zrnitostní složení sedimentu by mohl být také analyzován na půdě s vegetačními opatřeními během různých fenologických fází.

Z výsledků získaných laserovým difraktometrem je patrné, že na počátku deště obsahuje erodovaný půdní sediment větší částice než sediment odplavený po vytvoření erozních rýh, kdy se vyplavují částice jemnější. Při následném dešti na vyschlou půdu obsahující rýhy vytvořené předchozím deštěm se velikost částic půdního sedimentu lehce zvýší a po nasycení půdy se opět odplavuje sediment tvořený menšími částicemi. Množství půdních agregátů obsažených v sedimentu je nejvyšší na počátku dešťové epizody a postupně klesá po celou dobu, nezvýší se ani pauzou mezi dešti, během které půda vyschne, ale erozní rýhy zůstanou. Vliv sklonu kontejneru je zřejmý především pro sklon  $10^\circ$ , zde je zrnitost sedimentu nejjemnější a obsahuje nejméně půdních agregátů v porovnání s prudšími svahy. Zrnitostní složení půdních vzorků odebraných na kontejnerech se sklony  $22^\circ$ ,  $30^\circ$  a  $34^\circ$  se vzájemně skoro neliší, z čehož vyplývá, že při velkých sklonech se během dešťové události vytvoří erozní rýhy a na velikosti úhlu z hlediska zrnitostního složení sedimentu nezáleží.

V této diplomové práci bylo vyhodnocováno pouze zrnitostní složení sedimentu odplaveného během dešťové události z experimentálních ploch. Nebyly nijak porovnávány objemy odnášeného sedimentu ani rychlost proudění odtoku v průběhu deště. Tyto výsledky jsou zpracovávány mimo tuto práci a jejich porovnání by bylo nad její rámec. Pro ještě lepší porozumění procesům vodní eroze je plánované

vyhodnocení těchto veličin společně, jelikož se navzájem ovlivňují a současným spolupůsobením zapříčiňují odnos půdy. Zároveň je potřeba, pro lepší dotvoření představy o tvorbě rýh erozní událostí, porovnat zrnitostní složení sedimentu s 3D modelováním rýh, které na dané experimentální ploše vznikly. Toto modelování už také probíhá.

Aby bylo možné lépe vyhodnotit vliv protierozních geotextilií a získat tak relevantní výsledky, je potřeba pracovat s více vzorky půdního sedimentu, který je zachycen na experimentálních plochách s těmito opatřeními.

## 6 Seznam zdrojů

### 6.1 Literatura

DOSTÁL, Tomáš. Přednáška z předmětu Ochrana a organizace povodí. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, FSv ČVUT v Praze, 2018.

EAGRI [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, c2009-2019 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/vodni-eroze-pudy/>

JANEČEK, Miloslav. Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.

KAVKA, Petr. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017. [Výroční zpráva TAČR]. ČVUT v Praze, 2017.

KAVKA, Petr. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2018. [Výroční zpráva TAČR]. ČVUT v Praze, 2018.

NĚMEČEK, Jan., SMOLÍKOVÁ, L. & KUTÍLEK, M. Pedologie a paleontologie. Academia. Praha. 1990. ISBN 80-200-0153-0.

SNĚHOTA, Michal. Cvičení z Hydropedologie a Pedologie, Laboratorní cvičení č. 1, stanovení čáry zrnitosti a měrné hmotnosti. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, FSv ČVUT v Praze, 2018.

Dostupné z: [http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/PED/CviceniPED/Navod%20PEDOHYPE\\_lab1.pdf](http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/PED/CviceniPED/Navod%20PEDOHYPE_lab1.pdf)

ŠIMEČKOVÁ, Jana. ZRNITOSTNÍ SLOŽENÍ PŮDY [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: [https://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty/files/19/19-zrnitost.pdf](https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty/files/19/19-zrnitost.pdf)

## **6.2 Ostatní zdroje a manuály**

MASTERSIZER 2000 User Manual MAN0384. Worcestershire: Malvern Instruments Ltd., 2007.

MASTERSIZER 3000 User Manual MAN0474-08-EN-00. Worcestershire: Malvern Instruments Ltd., 2017.

PARIO Soil Particle Analyzer – manuál. Mnichov: METER Group, 2018.

## 7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Trojúhelníkový diagram - NRCS USDA (ŠIMEČKOVÁ, 2015) ..	14
Obrázek 2: Přístroj Mastersizer (1 - optická kazeta, 2 - jednotka pro přípravu rozptylu vzorku s kádinkou, 3 - počítačový systém). (MASTERSIZER Manuál, 2007) .....	19
Obrázek 3: Měřicí systém PARIO – přístroj PARIO, dva skleněné válce, gumová zátky (PARIO Manuál, 2018) .....	21
Obrázek 4: Venkovní experimentální plochy v Jirkově (KAVKA, 2017)...	23
Obrázek 5: Schéma experimentálních kontejnerů (KAVKA, 2017) .....	24
Obrázek 6: Nastavení vlastností materiálu pro zrnitostní analýzu laserovým difraktometrem .....	28
Obrázek 7: Nastavení parametrů měření zrnitostní analýzy laserovým difraktometrem .....	29
Obrázek 8: Měření zrnitostního složení přístrojem Mastersizer 3000 ....	30
Obrázek 9: Software Malvern – hlavní okno s naměřenými daty .....	31
Obrázek 10: Rozrušování půdních agregátů .....	32
Obrázek 11: Měření zrnitostního složení hustoměry .....	33
Obrázek 12: Sada sít v prosévacím přístroji .....	34
Obrázek 13: Zrnitostní křivky půdních vzorků vyhodnocené hustoměrnou zkouškou .....	38
Obrázek 14: Přístroj PARIO – postup měření .....	39
Obrázek 15: Měření zrnitostního složení přístroji PARIO .....	40
Obrázek 16: Přístroj PARIO a software PARIO Control během měření....	40
Obrázek 17: Zrnitostní křivky půdních vzorků vyhodnocené přístrojem PARIO .....	41
Obrázek 18: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 30°, S3) .....	44
Obrázek 19: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 30°, M2) .....	44

Obrázek 20: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 34°, M2) .....	45
Obrázek 21: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 34°, M2) .....	45
Obrázek 22: Porovnání zrnitostních křivek jednoho vzorku, získaných třemi metodami (sklon kontejneru 30°, M1) .....	46
Obrázek 23: Ukázka variability jednotlivých měření – sklon 22°, první část zadešťování (S1, S2, M1, M2) .....	49
Obrázek 24: Ukázka variability jednotlivých měření – sklon 22°, druhá část zadešťování (S3, S4, M3, M4) .....	50
Obrázek 25: Zrnitostní křivky samotné zeminy – před a po rozbití půdních agregátů .....	51
Obrázek 26: Porovnání zrnitostních křivek erodovaného sedimentu a samotné zeminy – před rozbitím agregátů .....	52
Obrázek 27: Porovnání zrnitostních křivek erodovaného sedimentu a samotné zeminy – po rozbití agregátů.....	52
Obrázek 28: Zrnitostní složení půdního sedimentu – sklon kontejneru 34° .....	54
Obrázek 29: Zrnitostní složení půdního sedimentu – sklon kontejneru 30° .....	54
Obrázek 30: Zrnitostní složení půdního sedimentu – sklon kontejneru 22° .....	55
Obrázek 31: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu před rozbitím agregátů a po rozbití agregátů.....	56
Obrázek 32: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu z venkovního a laboratorního dešťového simulátoru.....	57
Obrázek 33: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu suché a mokré varianty .....	58
Obrázek 34: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu na různých sklonech kontejnerů .....	59
Obrázek 35: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu suché a mokré varianty na venkovních experimentálních plochách.....	60

Obrázek 36: Porovnání zrnitostního složení erodovaného sedimentu na půdě s ochranou textilií a bez textilie.....	63
--	----

## 8 Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace půdního druhu podle Nováka (ŠIMEČKOVÁ, 2015) .....	14
Tabulka 2: Označení vzorků erodovaného sedimentu při jejich odebrání z experimentálních ploch .....	25
Tabulka 3: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 30°, S3.....	36
Tabulka 4: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 30°, M1 .....	36
Tabulka 5: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 34°, M2.....	36
Tabulka 6: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 30°, M2.....	37
Tabulka 7: Vyhodnocení zrnitostní analýzy půdního vzorku 34°, M2.....	37
Tabulka 8: Procentuální zastoupení částic menších než 10 µm.....	47
Tabulka 9: Zatřídění vybraných půdních vzorků podle Nováka.....	48
Tabulka 10: Průměrné procentuální zastoupení částic dané velikostní třídy z venkovních experimentálních ploch.....	61
Tabulka 11: Rozdíl procentuálního zastoupení částic dané velikostní třídy před a po rozbití půdních agregátů .....	62